П. О. ГРИБОВСКИЙ
Т. И. ТЕРЕНТЬЕВА

МИНИАТЮРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

П. О. ГРИБОВСКИЙ Т И ТЕРЕНТЬЕВА

МИНИАТЮРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1966 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.319.443.3
Г 82

В книге рассматриваются конструкции, основные параметры и технология изготовления малогабаритных керамических конденсаторов постоянной емкости — КЛГ.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, связанных с изготовлением и использованием электрических конденсаторов.

Грибовский Петр Оскарович,
Терентьева Татьяна Игоревна.
Миниатюрные керамические конденсаторы,
М.—Л., изд-во „Энергия", 1966, 144 стр. с илл.

$\frac{3\text{-}3\text{-}12}{336\text{-}66}$

Редактор *А. А. Енин* Техн. редактор *В. Н. Малькова*
Обложка художника *А. А. Иванова*

Сдано в набор 29/I 1966 г. Подписано к печати 7/VI 1966 г.
Т-07155 Бумага типографская № 1 84×108¹/₃₂ Печ. л. 7,56 Уч.-изд. л. 7,46
Тираж 15 000 экз. Цена 40 коп. Заказ 2234

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой вниманию читателей книге изложены основные принципы построения конструкций конденсаторов типа КЛГ, позволяющие значительно повысить их влагостойкость и надежность. Рассматриваются физико-химические основы технологии изготовления конденсаторов типа КЛГ горячим литьем под давлением. Книга содержит фактические данные о параметрах конденсаторов типа КЛГ и технологии их изготовления, представленные в виде графиков и таблиц.

Авторы выражают благодарность всему коллективу инженеров, техников и рабочих, принимавших участие в разработке и внедрении технологии изготовления конденсаторов типа КЛГ: В. И. Гольдштейн, Г. И. Егорову, А. М. Иванову, А. К. Миронову, М. Л. Миркину, Д. С. Чесалову, М. М. Юдашкиной, К. М. Юшиной, техникам М. А. Гордеевой, В. Н. Абрамовой.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Электрические конденсаторы постоянной емкости наряду с полупроводниковыми приборами, электронными лампами и сопротивлениями широко используются в радиоэлектронной аппаратуре. Развитие радиотехники, усложнение функций радиоустройств, увеличение числа радиодеталей, из которых состоит современная радиоэлектронная аппаратура, вызвали появление новых требований, предъявляемых к радиодеталям. Основными из них являются уменьшение объема и повышение надежности детали. Для конденсаторов эти требования сводятся к необходимости повышения их удельной емкости, верхнего предела рабочей температуры, механической прочности, влагостойкости и надежности. С точки зрения перечисленных требований следует отдать предпочтение конденсаторам с керамическим диэлектриком [Л. 1, 15].

Увеличение удельной емкости конденсаторов может быть достигнуто, если использовать диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью, при одновременном уменьшении толщины диэлектрика и рациональном использовании объема конденсатора. Диэлектрическая проницаемость керамических материалов, применяемых для изготовления конденсаторов, колеблется в пределах от 14 до 4 000, что значительно превышает диэлектрическую проницаемость всех остальных конденсаторных материалов. Уменьшение толщины керамического диэлектрика лимитируется требованиями механической и электрической прочности конденсатора, а также возможностями керамической технологии. Поэтому решение поставленной задачи может быть осуществлено путем создания такой конструкции конденсатора, в ко-

торой необходимая механическая и электрическая прочности получены при малых толщинах диэлектрика.

Для получения больших значений удельной емкости конденсатора конструкция его должна удовлетворять еще одному требованию, а именно: объем диэлектрика, разделяющий обкладки, должен приближаться к объему конденсатора. Естественно, что для осуществления такой конструкции нужны специальные технологические приемы.

При увеличении верхнего предела рабочей температуры конденсатора ухудшаются электроизолирующие свойства большинства конденсаторных диэлектриков и материалов влагозащитного покрытия. Повышение температуры вызывает увеличение проводимости и диэлектрических потерь диэлектриков и уменьшение их электрической прочности. Длительное воздействие высокой температуры при наличии электрической нагрузки может привести к необратимым изменениям параметров конденсаторов, связанным с электрохимическим старением материала диэлектрика и влагозащитного покрытия. Неорганические, в частности керамические, диэлектрики значительно меньше подвержены старению. Керамическим диэлектрикам следует отдать предпочтение также и с точки зрения температурной стабильности их параметров.

Механическая прочность конденсаторов с керамическим диэлектриком, обладающим большой механической прочностью, характеризуется в основном прочностью выводов и крепления их к обкладкам, т. е. прочностью контактного узла конденсатора. Надо отметить, что при увеличении температуры до значений, лежащих значительно ниже точки плавления припоя, которым припаяны выводы к обкладкам конденсатора, происходит существенное уменьшение прочности контактного узла.

Проблема повышения влагостойкости радиодеталей является одной из основных и наиболее сложных. Большая часть керамических конденсаторных материалов влагостойка и негигроскопична, но вместе с тем микрогеометрия их поверхности способствует образованию пленки влаги, которая при малых расстояниях между обкладками керамического диэлектрика шунтирует последний. Для защиты керамических конденсаторов от

влаги их поверхность обычно покрывают различными органическими изоляционными покрытиями (лаки, компаунды, смолы, эмали). Однако такого рода покрытия не обеспечивают надежную работу конденсаторов при большой относительной влажности (98%) и повышенной температуре (40° С). Положение усложняется тем, что в большинстве технических условий (ТУ) на конденсаторы гарантия их работоспособности в условиях относительной влажности 98% и при температуре 40° С фактически не обеспечивается ни их конструкцией, ни свойствами используемых материалов. Методы испытания в этих технических условиях не предусматривают проверки работоспособности конденсаторов в упомянутых условиях (например, см. ГОСТ 7159-64, п. 1.3, стр. 2 и п. 3.11, стр. 22).

Надежность конденсаторов в связи с широким использованием их в радиоэлектронной аппаратуре играет определяющую роль в ее работе. Степень надежности радиодеталей зависит главным образом от технического уровня технологии и культуры производства. Отсутствие стабильности технологических процессов, несовершенство технологии контроля способствуют появлению наряду с качественными дефектных изделий. Очевидно, что при эксплуатации однотипных изделий вероятность отказа больше у дефектных.

Повышению культуры производства в значительной мере способствовало применение технологии горячего литья [Л. 10]. На базе этой технологии были созданы конденсаторы типа КЛГ[1] [Л. 9], отличающиеся малыми размерами и большой удельной емкостью. Конденсаторы этого типа, разработанные сравнительно недавно, нашли широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре, но вопросы технологии их изготовления и эксплуатационные характеристики освещены недостаточно. В настоящей книге наряду с эксплуатационными характеристиками, конструкцией и технологией изготовления конденсаторов КЛГ освещены также вопросы, связанные с необходимостью повышения удельной емкости, температуростойкости, механической прочности, влагостойкости и надежности конденсаторов.

[1] Один из вариантов конструкции этих конденсаторов выпускается под индексом КЛС.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРОВ ТИПА КЛГ

1. ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ

Общий вид конденсаторов типа КЛГ приведен на рис. 1. Конденсатор состоит из керамического корпуса, металлических электродов, двух контактных узлов с выводами и изоляционно-защитного покрытия. Корпус конденсатора (рис. 2) представляет собой прямоугольную призму из керамического материала, который служит одновременно и диэлектриком конденсатора. Узкие прорези прямоугольного сечения образуют в призме ряд тонких керамических пластин. Ширина прорезей составляет δ=100—200 *мк*, а толщина керамических пластин Δ=140—510 *мк* (экспериментально подтверждена также возможность получения толщин 70—100 *мк*).

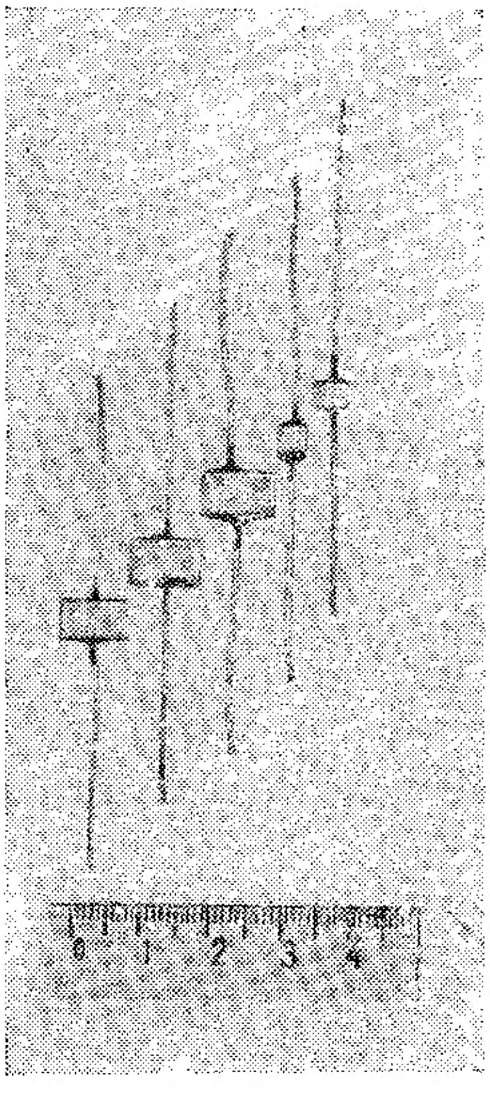


Рис. 1. Общий вид конденсаторов типа КЛГ.

На рис. 2 приведены три варианта конструкции керамического корпуса конденсаторов типа КЛГ.

Для изготовления корпуса КЛГ могут использоваться любые керамические конденсаторные материалы. На все поверхности керамического корпуса КЛГ, за исключением поверхностей *А*, *Б*, *В* и *Г*, нанесен тонкий слой (3—12 *мк*) металла, образующий электроды конденсатора. Обычно материа-

лом электродов служит серебро. Однако в зависимости от назначения конденсатора могут использоваться и другие металлы: медь, палладий, платина и т. п.

Электрическая схема конденсаторов КЛГ (с некоторым приближением) может быть представлена как *n*

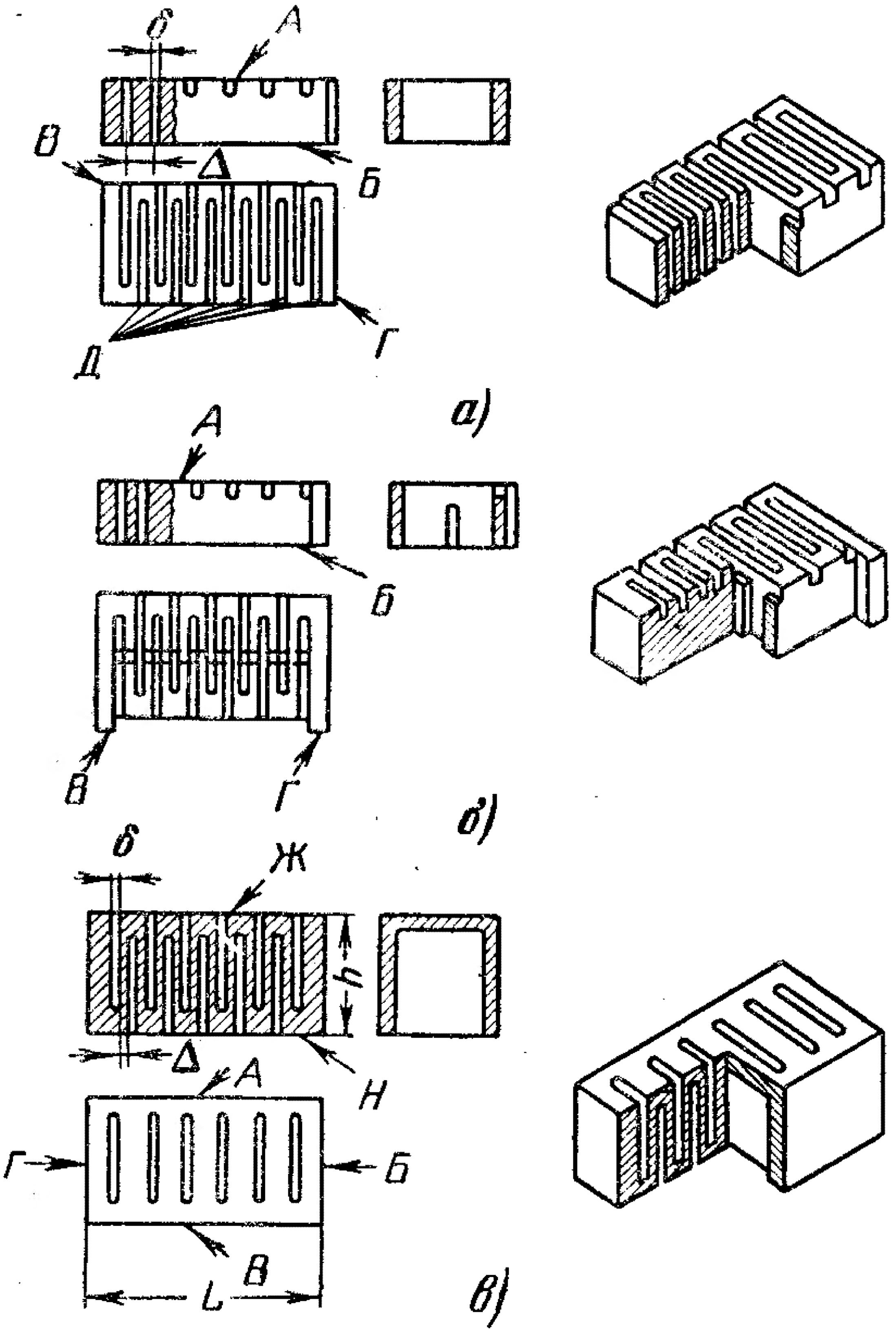


Рис. 2. Конструкции керамического корпуса конденсаторов типа КЛГ.

а — со сквозными прорезями; *б* — со сквозными прорезями и ребром жесткости; *в*—с глухими прорезями.

плоских параллельно соединенных конденсаторов. Для получения такой схемы у конденсаторов со сквозными прорезями (рис. 2,*а*, *б*) электроды, нанесенные на поверхности отдельных пластин, соединены с наружными электродами, находящимися на гранях корпуса, с помощью выводных каналов *Д*. У этих конденсаторов

края электродов отдельных пластин находятся на расстоянии, равном толщине пластин (диэлектрика). В конструкциях конденсаторов с «глухими» прорезями (рис. 2,*в*) электрическое соединение электродов отдельных пластин осуществляется на гранях *Ж* и *Н*. В этом

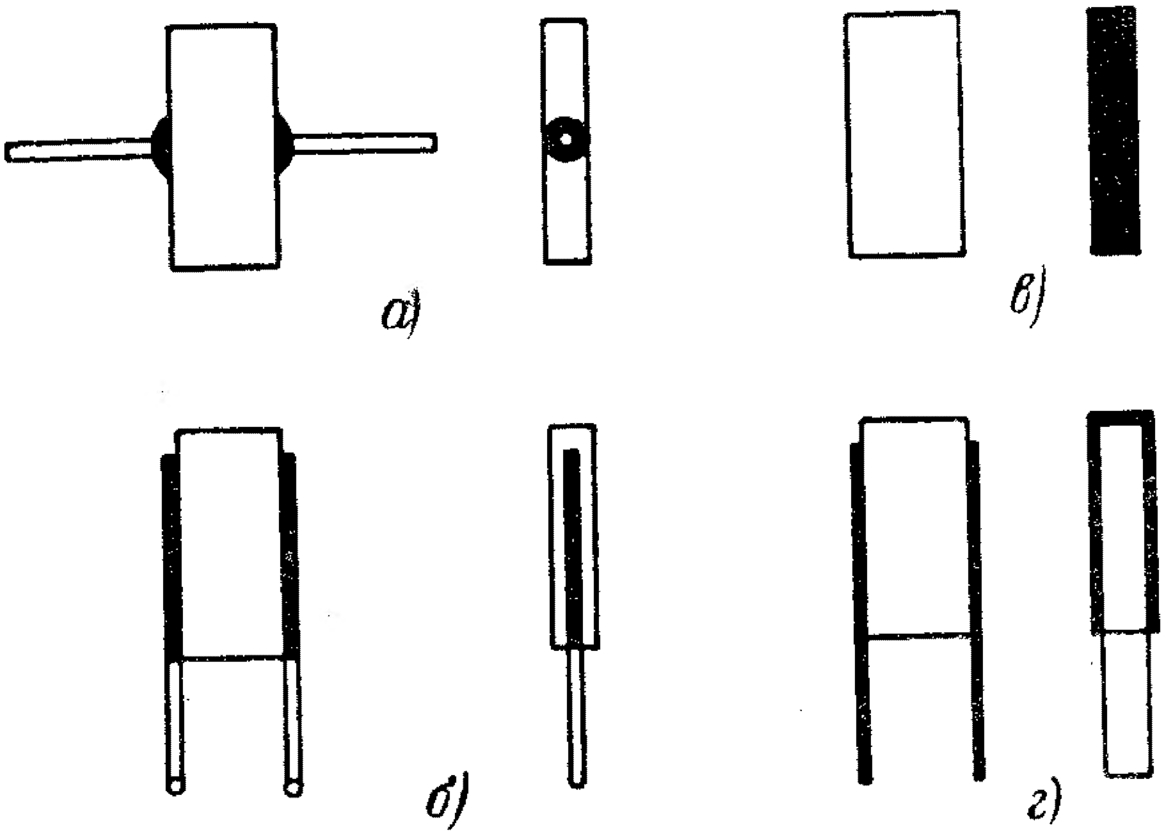


Рис. 3. Конструкции контактного узла конденсаторов типа КЛГ.

а — с проволочными выводами, закрепленными перпендикулярно грани конденсатора; *б* — с проволочными выводами, расположенными вдоль грани конденсатора; *в* — без выводов с облуженными гранями; *г* — с плоскими ленточными выводами.

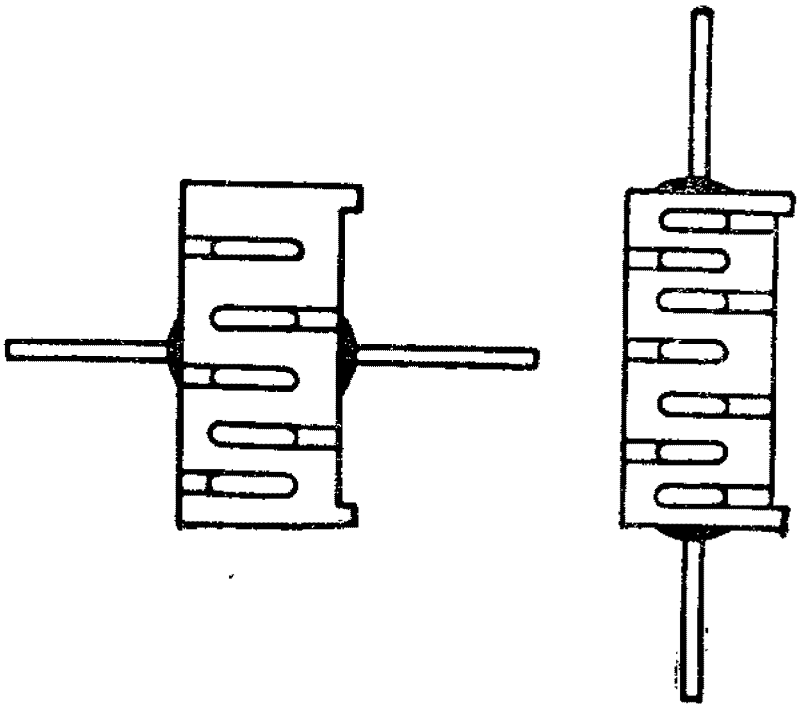
случае расстояние между краями электродов значительно превышает толщину пластин диэлектрика.

Контактные узлы конденсаторов КЛГ в зависимости от назначения последних могут быть выполнены в четырех конструктивных вариантах. Первый вариант конструкции (рис. 3,*а*) контактного узла с медными или латунными проволочными выводами (∅ 0,6 *мм*), припаянными перпендикулярно граням конденсатора, применяется наиболее часто, обеспечивая высокую механическую прочность контактного узла. В целях предохранения от коррозии проволочные выводы покрыты тонким слоем серебра.

Второй вариант конструкции контактного узла (рис. 3,*б*) применяется в основном при использовании конденсаторов в печатном монтаже. Прочность контактного узла достаточно высока, если нагрузка приложена вдоль оси вывода. Приложение растягивающего усилия, направленного перпендикулярно оси вывода (и плоско-

сти грани конденсатора), не допускается, так как при этом при относительно небольших усилиях произойдет отрыв вывода.

Третий вариант конструкции (рис. 3,*в*) не получил широкого распространения, так как пайка контактов непосредственно при монтаже в радиоаппаратуре приводит в ряде случаев к снижению надежности конденсаторов из-за перегревания серебряных электродов.



а) *б)*

Рис. 4. Расположение выводов на гранях конденсаторов со сквозными прорезями.

Четвертый вариант (рис. 3,*г*) применяется для конденсаторов, используемых в качестве контурных в УКВ диапазоне частот. В качестве выводов здесь применена медная или латунная фольга, покрытая слоем серебра.

Следует отметить, что у конденсаторов со сквозными прорезями возможны два варианта расположения выводов на гранях корпуса. В первом (рис. 4,*а*) механическая прочность конденсатора определяется прочностью контактного узла или прочностью на разрыв всех пластин конденсатора, во втором (рис. 4,*б*) — прочностью двух тонких (крайних) керамических пластин. Исследования показали, что механическая прочность конденсатора в этом случае по сравнению с прочностью конденсатора рис. 4,*а* снижается более чем в 2 раза.

Для работы конденсаторов при температурах до 155° С во всех вариантах конструкций контактного узла конденсаторов типа КЛГ применен припой марки ПСР-10-90 с температурой плавления 300° С. Этот припой представляет собой сплав 90% олова и 10% серебра.

В зависимости от области применения и конструктивных особенностей конденсаторы типа КЛГ можно подразделить на три группы:

1) КЛГ со сквозными прорезями и органическим изоляционно-защитным покрытием (выпускаемые под

индексом КЛС) предназначены для малоответственной радиоаппаратуры, работающей в условиях невысокой относительной влажности (до 80%);

2) КЛГ со сквозными прорезями и неорганическим (стеклянным) изоляционно-защитным покрытием предназначены для применения в более ответственной радиоаппаратуре, допускающей кратковременную электрическую нагрузку в условиях повышенной относительной влажности;

3) КЛГ с «глухими» прорезями без изоляционно-защитного покрытия межэлектродного расстояния предназначены для наиболее ответственной радиоаппаратуры, работающей в условиях повышенной влажности и требующей высокой надежности радиоэлементов.

Использование того или иного материала диэлектрика (керамики) в сочетании с одним из перечисленных вариантов конструкции конденсаторов типа КЛГ определяет их основные параметры и, следовательно, область применения.

2. МАТЕРИАЛ ДИЭЛЕКТРИКА

Выбор диэлектрика для конденсаторов зависит от назначения конденсатора и определяется параметрами диэлектрика: диэлектрической проницаемостью и ее зависимостью от температуры (ТКЕ), добротностью, удельным объемным сопротивлением, электрической и механической прочностью, температуростойкостью, влагостойкостью и стабильностью свойств во времени.

Широкое применение для изготовления керамических высокочастотных конденсаторов нашли материалы на основе титаната циркония $ZrTiO_4$, двуокиси титана TiO_2, цирконата и титаната кальция $CaZrO_3$ и $CaTiO_3$ и др. Для всех этих материалов характерны малые диэлектрические потери: $\operatorname{tg}\delta \leqslant 10 \cdot 10^{-4}$, т. е. большая добротность ($Q = 1/\operatorname{tg}\delta$). Для разделительных низкочастотных конденсаторов используются материалы на основе титаната бария и титаната стронция со сверхвысокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon = 3\,000$) и относительно большими диэлектрическими потерями $\operatorname{tg}\delta = (50—200) \cdot 10^{-4}$. Методы измерения основных параметров и свойства перечисленных конденсаторных материалов освещены в [Л. 1, 2].

Таблица 1

Группа ТКЕ	Материал диэлектрика	Кристаллическая основа	Параметры конденсаторных материалов				
			Коэффициент термического расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, °С$^{-1}$	Диэлектрическая проницаемость ε при 25° С	$\times 10^{-6}$ ТКЕ (в диапазоне температур от 30—70° С), °С$^{-1}$	$\times 10^{-4}$ tg δ при 25° С	Удельное объемное сопротивление ρ при 25° С, *ом·см*$^{-1}$
М47	ТК-20	$ZrTiO_4$	7,5—8	28—30	—47	2,5—5,5	10^{14}—10^{15}
М75	ТК-20-80	$ZrTiO_4$	7,5—8	30—32	—75	3,5—6	10^{14}—10^{15}
М700	Т-80	TiO_2	7,5—8	79—88	—700	4—5,5	10^{13}—10^{14}
М1300	Т-150	$CaTiO_3$	10,6	150—165	—1 300	2—4	10^{14}—10^{15}
Н40	Т-900	$(SrBi)\ TiO_3$	8,9	900—1 000	Не нормируется	5—10	10^{12}—10^{14}
Н70	СМ-1	$(BaTiO_3)_{0,9} \times$ $\times (BaZrO_3)_{0,075}$	—	2 700—3 000	То же	100—200	10^{11}—10^{13}

Как уже упоминалось, конденсаторы типа КЛГ благодаря применению технологии горячего литья могут быть изготовлены из любого керамического материала. Поэтому для их изготовления в первую очередь были использованы конденсаторные материалы, применяющиеся в промышленности. Характеристики этих материалов приведены в табл. 1.

Значения температурного коэффициента емкости ТКЕ высокочастотных конденсаторных материалов в различных диапазонах температуры приведены в табл. 2, а температурная зависимость диэлектрической проницаемости низкочастотных конденсаторных материалов — на рис. 5. Нелинейность значений ТКЕ в исследованном диапазоне температур обусловливает относительно большие допуски на отклонения ТКЕ конденсаторов от номинального значения: для М47 и М75 — $\pm 30 \cdot 10^{-6}$, 1/° С; М700 — $\pm 200 \cdot 10^{-6}$ 1/° С и М1300 — $\pm 300 \cdot 10^{-6}$ 1/° С;

Существенное изменение диэлектрической проницаемости низкочастотных материалов в зависимости от температуры вызывает необходимость расширения допусков на отклонения от номинального значения емко-

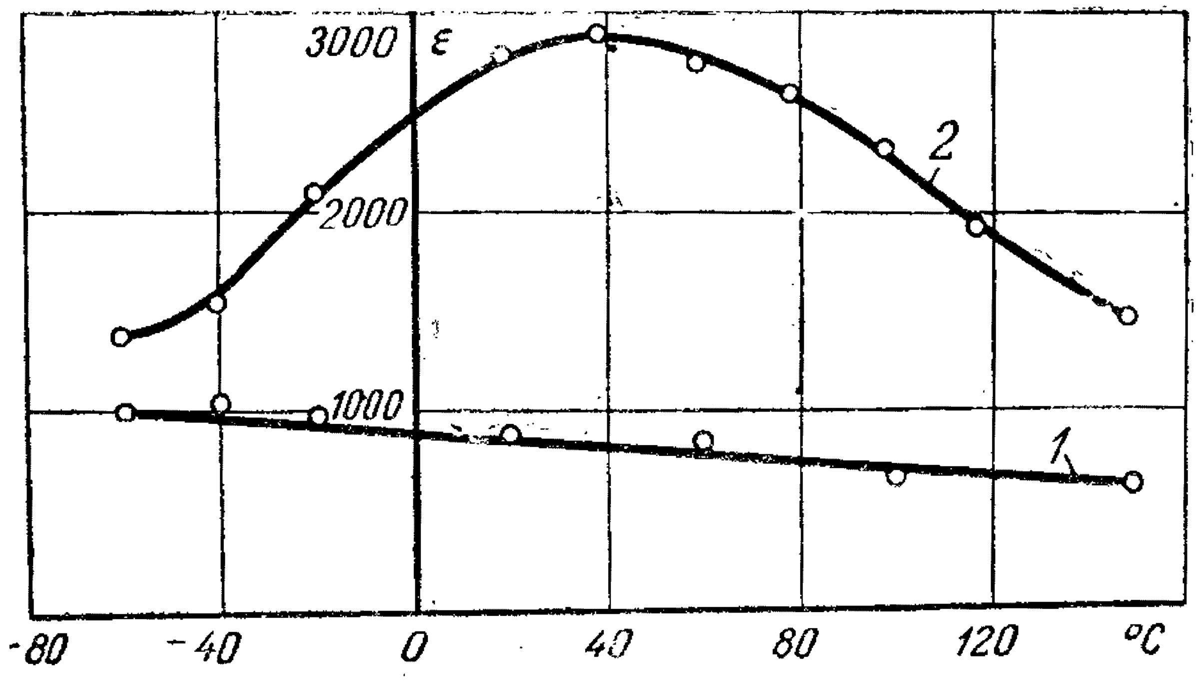


Рис. 5. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости при частоте 1 000 *гц* и напряжении 2—5 *в*.

1— Т-900; 2— СМ-1.

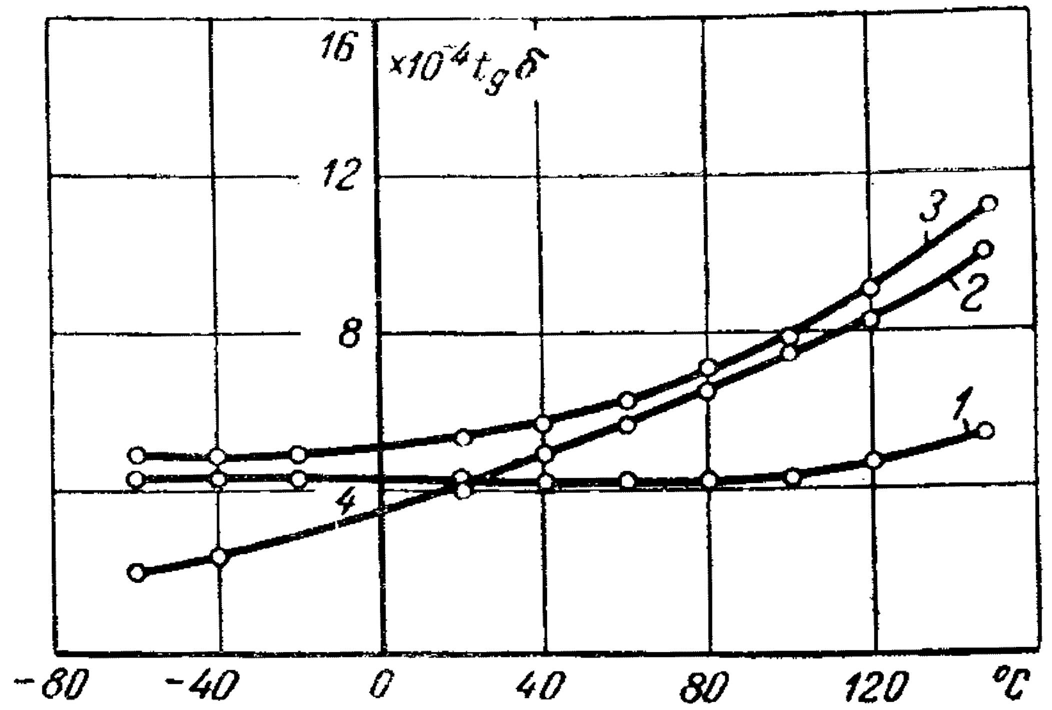
сти конденсаторов. Для конденсаторов, изготовленных из материалов Т-900, допускаемые отклонения составляют ±20%, а из СМ-1—70%.

Таблица 2

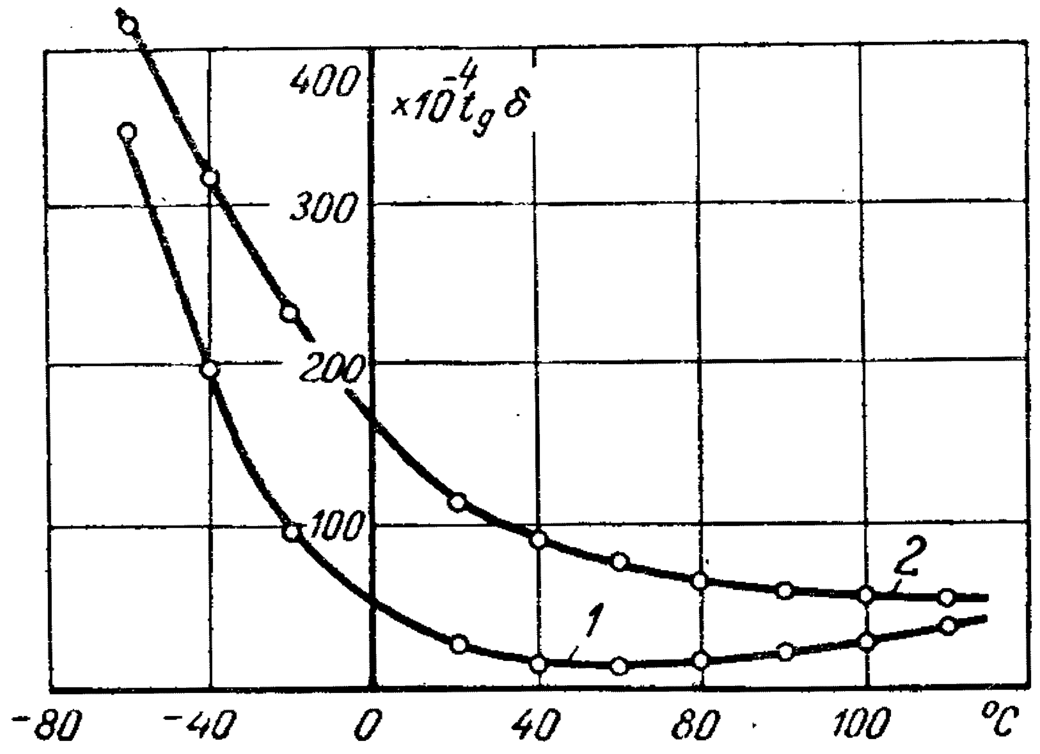
Группа ТКЕ	Материал диэлектрика	Значения 10^{-6} ТКЕ в различных интервалах температур, °С$^{-1}$		
		от —60 до + 30 °С	от +30 до + 70 °С	от +30 до + 150°С
М47	ТК-20	—75	—63	—32
М75	ТК-20-80	—116	80	66
М700	Т-80	—720	630	580
М700	Ц-70	—713	640	565
М1300	Т-150	— 1 600	1 320	1 050

Величины диэлектрических потерь у исследованных материалов и их зависимость от температуры и частоты приведены соответственно на рис. 6 и 7.

На рис. 8 приведены зависимости удельного объемного сопротивления некоторых конденсаторных материалов от температуры при различных градиентах постоянного электрического поля. Эти зависимости были



а)



б)

Рис. 6. Температурная зависимость диэлектрических потерь.

а — частота 1—3 *Мгц*: *1* — Т-150; *2* — ТК-20; *3* — Т-80; *б* — частота 1 000 *гц*; *1* — Т-900, *2* — СМ-1.

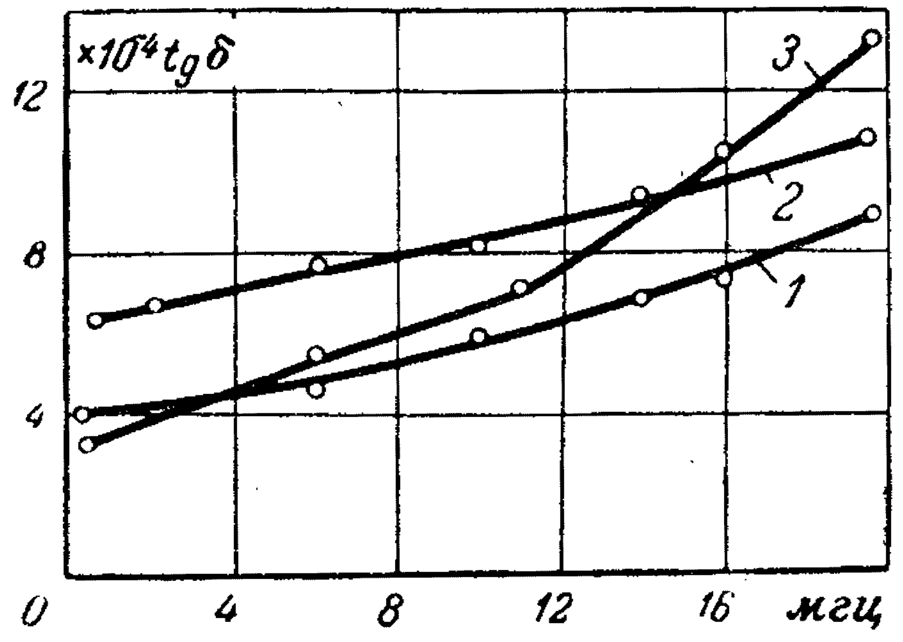


Рис. 7. Частотная зависимость диэлектрических потерь при температуре 20° С.

1 — ТК-20; *2* — Т-80; *3* — Т-150.

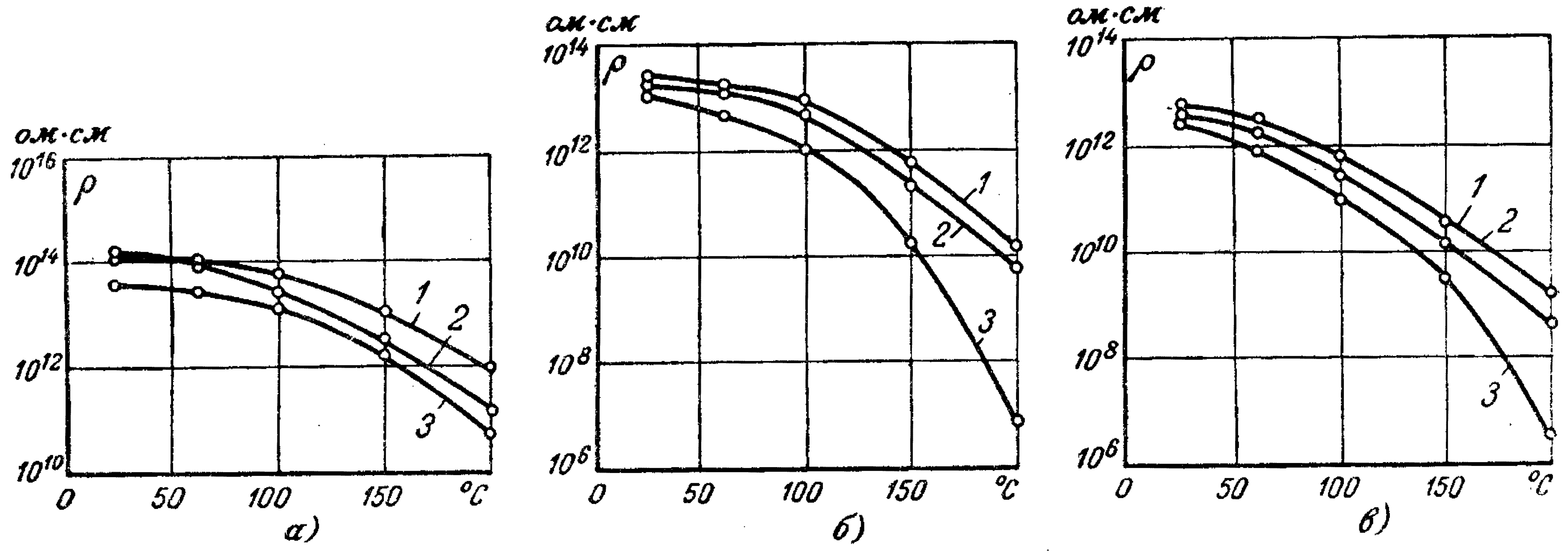


Рис. 8. Температурная зависимость объемного сопротивления при различных градиентах постоянного электрического поля.

1 — 400 *в/мм*; *2* — 800 *в/мм*; *3* — 2 700 *в/мм*; *а* — ТК-20; *б* — Т-80; *в* — Т-900, кривая *3* — 1 400 *в/мм*.

использованы для выбора рабочих градиентов и температур, например, для материалов Т-80 и Т-900, удельные объемные сопротивления которых с повышением температуры заметно уменьшались, предельные значения

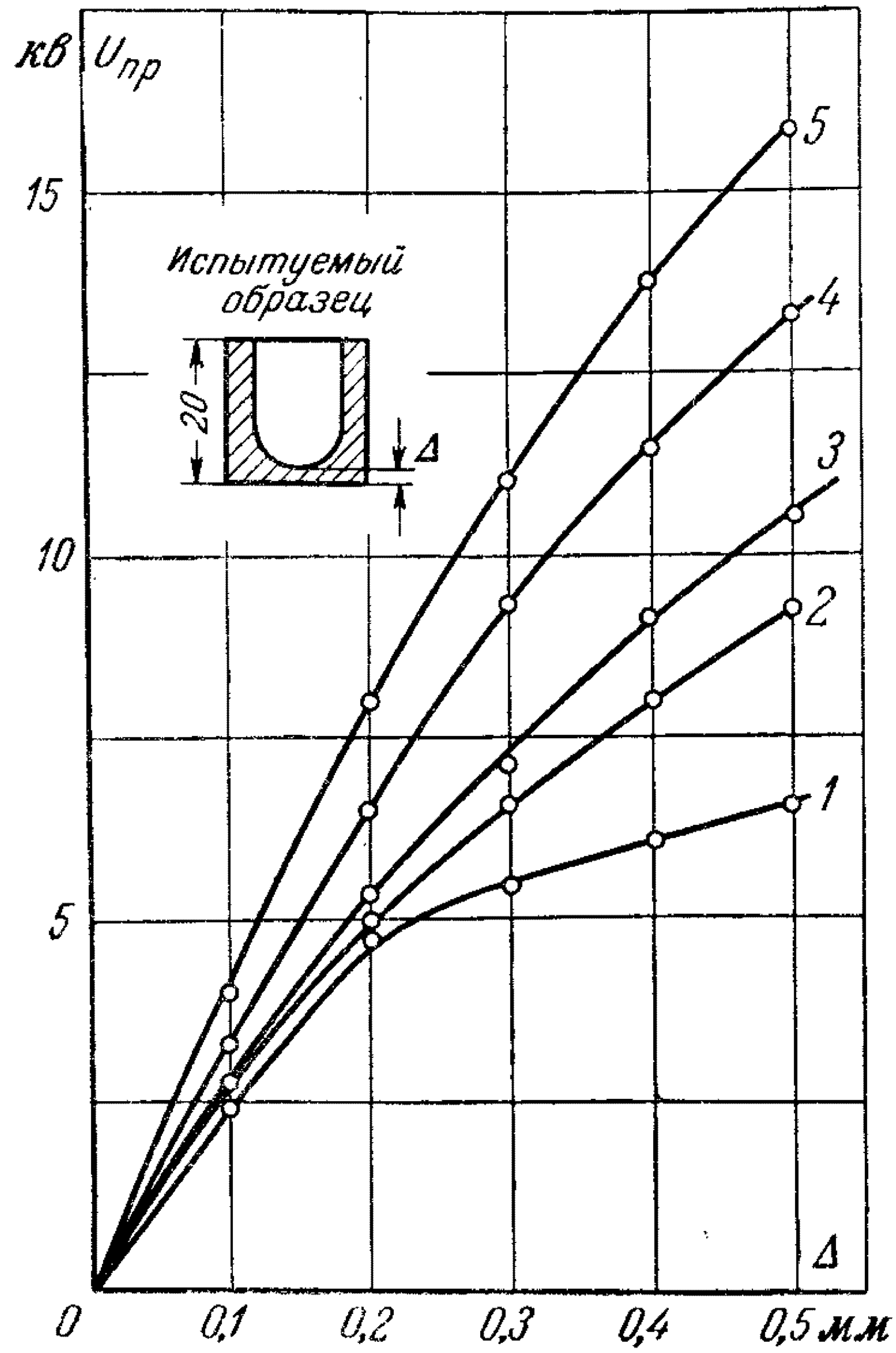


Рис. 9. Зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика.

1 — СМ-1, ε=3 000; *2* — Т-900, ε=900; *3* — Т-150, ε=150; *4* — Т-80, ε=80; *5* — ТК-20, ε=27.

рабочих температур соответственно составляли 125 и 100° С, а рабочий градиент 800 *в/мм*; предельное значение рабочей температуры для материала ТК-20 соответствует 155° С при том же значении градиента.

Электрическая прочность диэлектриков характеризуется отношением напряжения, при котором произошел пробой диэлектрика, к его толщине. Определение электрической прочности керамических диэлектриков про-

изводилось на образцах, имеющих форму, обусловливающую однородное электрическое поле в предполагаемом месте пробоя [Л. 6]. На рис. 9 приведены результаты измерения пробивных напряжений $U_{пр}$ различных диэлектриков в зависимости от их толщины Δ. Характер полученных кривых $U_{пр}=f(\Delta)$ свидетельствует о том, что электрическая прочность исследуемых диэлектриков уменьшается с увеличением их толщины. Последнее характерно для большинства технических диэлектриков и объясняется тем, что с увеличением толщины диэлектрика увеличивается неоднородность его структуры.

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ

От геометрических размеров конденсаторов зависят емкость, удельная емкость, сопротивление изоляции, электрическая и механическая прочность.

Емкость конденсаторов пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика:

$$C=\chi\varepsilon, \tag{1}$$

где χ — коэффициент пропорциональности, являющейся функцией числа рабочих пластин m, геометрических размеров и конструктивных особенностей конденсатора.

С достаточно большим приближением к истинному значению коэффициент χ может быть выражен:

а) для конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями (рис. 10) как

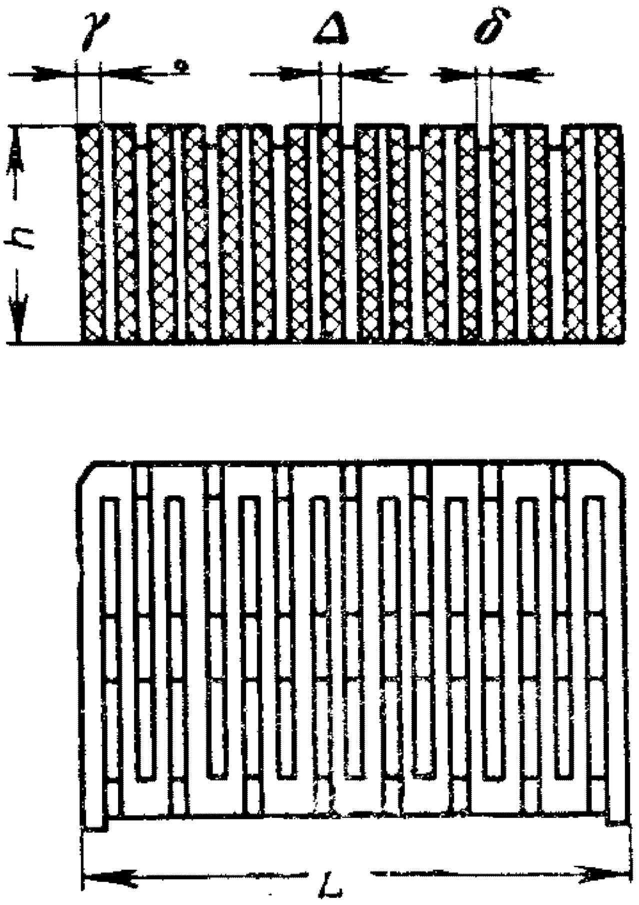
$$\chi_c = h\left(\frac{m\left(a-2e-\frac{2}{3}d\right)}{11{,}3\Delta}+\frac{m+1}{3{,}6\ln\frac{e+0{,}5\delta}{0{,}5\delta}}+\frac{2\left(a-2e-\frac{2}{3}d\right)}{11{,}3e}\right); \tag{2}$$

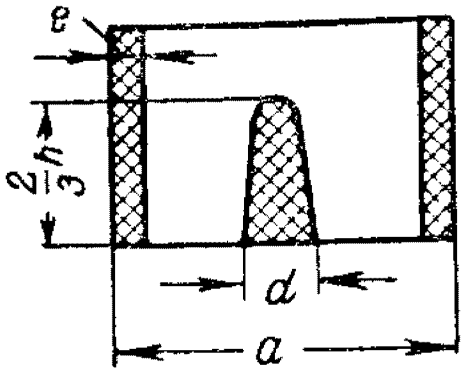
б) для конденсаторов с глухими прорезями (рис. 11) как

$$\chi_г = m\left(\frac{(a-2e)(h-2b)}{11{,}3\Delta}+\frac{h}{3{,}6\ln\frac{e+0{,}5\delta}{0{,}5\delta}}+\frac{2h\Delta}{11{,}3a}\right), \tag{3}$$

где геометрические размеры конденсатора Δ, δ, h, a, e, d, b приведены соответственно на рис. 10 и 11.

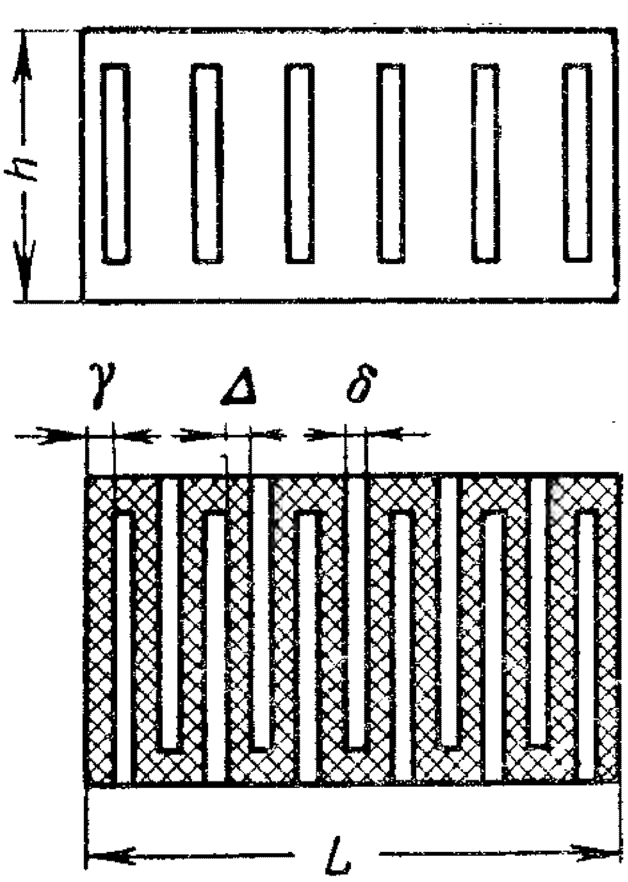
Емкость конденсатора можно варьировать путем изменения его габаритных размеров (a, h и L), толщины пластин диэлектрика Δ, размеров прорезей δ, применения материалов диэлектрика с различной диэлектрической проницаемостью ε.

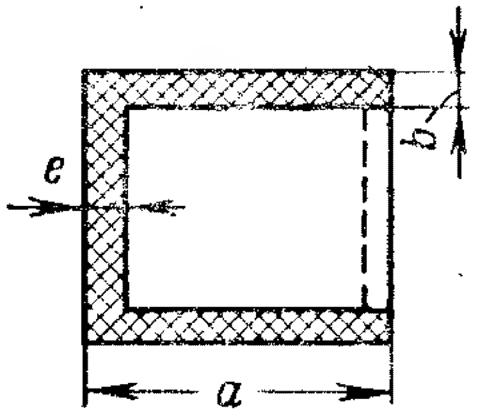




Геометрические размеры конденсатора, *см*						
L макс	h макс	a	e	d	δ	γ
1	0,28	0,58	0,05	0,04	0,014	0,05

Рис. 10. Керамический корпус конденсатора типа КЛГ со сквозными прорезями.





Геометрические размеры конденсатора, *см*						
L макс	h	a	e	b	δ	γ
1	0,4	0,5	(0,8÷0,9)Δ	0,025	0,014	Δ+0,005

Рис. 11. Керамический корпус конденсатора типа КЛГ с глухими прорезями.

Для получения широкой шкалы номинальных значений емкостей конденсаторов типа КЛГ используются все перечисленные факторы. При этом грубая градация по емкости обеспечивается использованием керамических материалов с различной диэлектрической проницаемостью (27; 80; 150; 900; 3 000 и т. д.). Пределы номинальных значений емкостей конденсаторов при использовании того или иного материала определяются их конструктивными размерами. Выбор конструктивных размеров регламентируется технологическими требованиями, а также необходимостью получения минимального числа типоразмеров в целях облегчения механизации производственных процессов (изготовление КЛГ и их монтаж в радиоаппаратуре). Экспериментально было установлено, что габариты КЛГ не должны превышать следующих размеров: $a \times h \times L = 6 \times 4 \times 10$ *мм.*

С целью расширения шкалы номинальных значений емкостей конденсаторы по габаритным размерам разделены на группы: для конденсаторов со сквозными прорезями их пять: 4×4×4, 5×4×5, 6×4×6, 6×4×8, 6×4×10 *мм*; для конденсаторов с глухими прорезями четыре: 5×4×4, 5×4×6, 5×4×8 и 5×4×10 *мм*. Поперечное сечение у конденсаторов с глухими прорезями постоянно для всех типоразмеров ($a \times h = 5 \times 4$ *мм*), что существенно снижает технические трудности как при их изготовлении, так и при монтаже (расстояние между выводами постоянно).

В пределах заданных габаритов емкость конденсатора (из данного материала) зависит от толщины пластин диэлектрика Δ и размеров прорезей δ. Толщина пластин диэлектрика определяет не только емкость конденсатора, но и его электрическую прочность, рабочие градиенты и другие электрические параметры. Ширина прорезей δ ограничивает число пластин диэлектрика при заданной их толщине и постоянной длине конденсатора. Для получения наибольшей удельной емкости конденсатора ширина прорезей должна быть минимальной. Уменьшение ширины прорезей регламентируется технологией изготовления конденсаторов. Оптимальное ее значение составляет 0,13—0,15 *мм*. Плавное изменение емкости конденсатора в пределах каждой из пяти или четырех габаритных групп при постоянной ширине прорезей и толщине диэлектрика

осуществляется для конденсаторов со сквозными прорезями изменением их высоты h, а для конденсаторов с глухими прорезями — изменением их длины L. Уменьшение высоты конденсаторов со сквозными прорезями от ее максимального значения (2,8—3 *мм*) до значения 2—2,2 *мм* производится шлифовкой. Если при этом требуемое значение высоты получается с точностью ±0,04 *мм*, то точность величины получаемой емкости оценивается ±1%. Изменение длины конденсаторов с глухими прорезями достигается уменьшением числа рабочих пластин, что приводит к ступенчатому изменению емкости конденсатора. При этом величина «ступенек» будет зависеть от емкости одной пластины. Поэтому для более плавного (необходимого для получения полной шкалы номинальных значений емкостей по ГОСТ) изменения емкости градация конденсаторов по толщине пластин диэлектрика у КЛГ с «глухими» прорезями расширена.

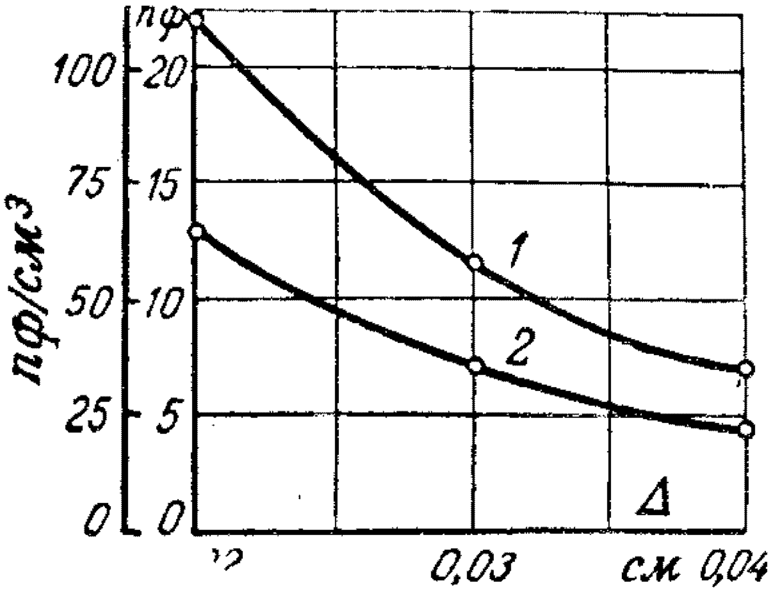


Рис. 12. Зависимость емкости и удельной емкости конденсаторов типа КЛГ (расчетное значение) от толщины пластин. Объем конденсаторов 0,2 $см^3$, диэлектрическая проницаемость диэлектрика условно принята равной 1.

1 — глухие прорези; *2* — сквозные прорези.

Удельная емкость конденсаторов КЛГ, выраженная в $пф/см^3$, определяется:

для конденсаторов со сквозными прорезями как

$$C_{уд} = \frac{\varepsilon \varkappa_c}{(a+\gamma)(h+\gamma)(L+\gamma)}, \qquad (4)$$

где $\gamma = 0{,}03$ *см*, толщина слоя изоляционного покрытия;

для конденсаторов с «глухими» прорезями как

$$C_{уд} = \frac{\varepsilon \varkappa_г}{ahL}. \qquad (5)$$

Изменение емкости в зависимости от толщины пластин конденсаторов с глухими и сквозными прорезями при условии равенства их объемов показано на рис. 12. При малых толщинах пластин удельная емкость кон-

денсаторов с глухими прорезями заметно превосходит удельную емкость конденсаторов со сквозными прорезями. При увеличении толщины пластин значения удельных емкостей этих конденсаторов сближаются. Различие удельных емкостей конденсаторов со сквозными и глухими прорезями является результатом более рациональной конструкции последних с точки зрения устранения конструктивных элементов, увеличивающих объем конденсатора (изоляционно-защитное покрытие, ребро жесткости и т. д.).

Сопротивление изоляции конденсатора типа КЛГ может быть с некоторым приближением выражено как

$$R_{из} = \rho \frac{\Delta}{Sm}, \qquad (6)$$

где ρ — удельное объемное сопротивление изоляции диэлектрика, *ом · см*$^{-1}$;

S — площадь электродов, *см*^{2};

m — число рабочих пластин.

На рис. 13 приведены расчетные значения сопротивления изоляции в зависимости от толщины пластин для конденсаторов равных объемов. Расчет сопротивления изоляции производился по формуле (6); условно было принято, что $\rho = 1$.

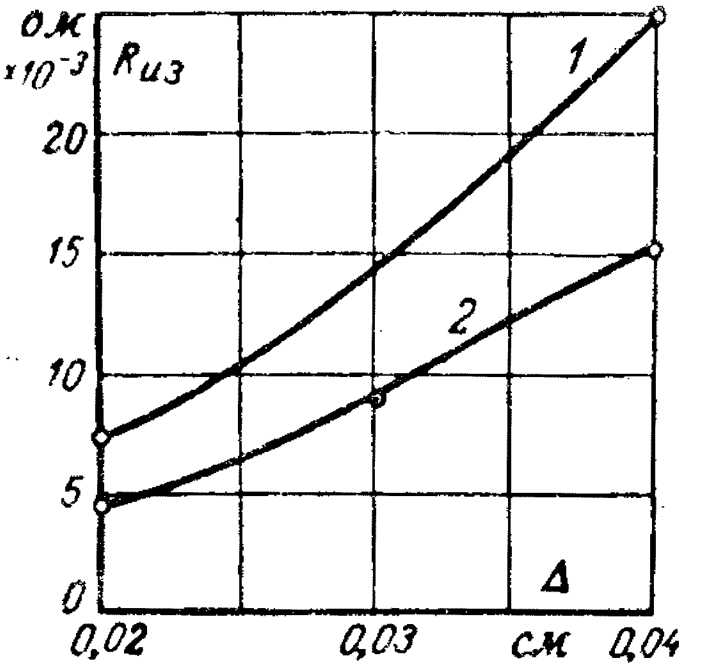


Рис. 13. Зависимость сопротивления изоляции конденсаторов типа КЛГ (расчетные значения) от толщины пластин.

1 — сквозные прорези; *2* — глухие прорези.

Сопротивление изоляции конденсаторов со сквозными прорезями несколько выше (при равных толщинах) за счет меньшей площади их электродов, чем у конденсаторов с глухими прорезями. Габаритные размеры конденсаторов приведены на рис. 10, 11.

Как видно из рис. 13, сопротивление изоляции конденсаторов несколько увеличивается с увеличением толщины пластин. По данным расчета $R_{из}$ колеблется при изменении толщины пластин от 0,2 до 0,4 *мм* в пределах:

$$R_{из} = \rho\,(0{,}6—3{,}4) \cdot 10^{-3}. \qquad (7)$$

Электрическая прочность конденсатора прежде всего характеризуется толщиной и электрической прочностью диэлектрика, разделяющего его обкладки. Кроме того, этот параметр зависит от геометрической формы конденсатора и электродов, определяющих характер его электрического поля.

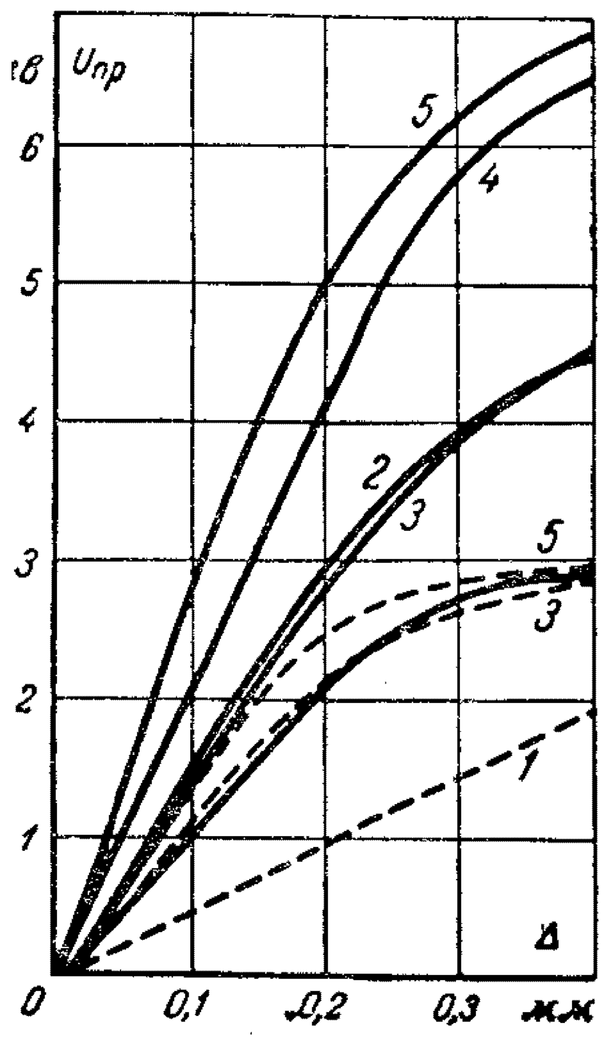


Рис. 14. Зависимость пробивного напряжения конденсаторов типа КЛГ со сквозными (пунктирные кривые) и глухими (сплошные кривые) прорезями от толщины пластин.

1 — СМ-1; *2* — Т-900; *3*—Т-150; *4* — Т-80; *5* — ТК-20.

Как уже отмечалось, конденсатор КЛГ состоит из *n* параллельно соединенных плоских конденсаторов. Равномерное поле между электродами этих конденсаторов искажается у краев электродов, где напряженность поля больше. Поэтому электрический пробой плоских конденсаторов следует ожидать у краев электродов, а значения пробивных напряжений должны быть ниже тех значений, при которых диэлектрик пробивается в однородном поле. Для уменьшения краевого эффекта электроды конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями защищаются изоляционным материалом, а у конденсаторов с глухими прорезями электроды либо находятся в теле диэлектрика, либо разведены на расстояние, значительно превышающее толщину диэлектрика.

Для определения электрической прочности конденсаторов типа КЛГ они испытывались напряжением постоянного тока.

Обычно при измерениях пробивных напряжений на партии одинаковых конденсаторов наблюдается разброс полученных значений. Напряжения пробоя для отдельных конденсаторов отличаются иногда более чем на 30%. Поэтому для получения достоверных результатов испытывалось по 30—50 шт. однотипных конденсаторов, а оценка электрической прочности проводилась при помощи функции распределения и интегральной кривой, получаемых следующим образом [Л. 13].

Предположим, что в результате измерения пробивного напряжения для партии, насчитывающей N конденсаторов, оказалось, что наименьшее значение напряжения составит $U_{мин}$, а наибольшее $U_{макс}$, разность напряжений $U_{макс}-U_{мин}$ разделяют на ряд одинаковых небольших интервалов. В каждом интервале находят среднее пробивное напряжение $\overline{U}_к = \frac{U_{макс} - U_{мин}}{2}$ и количество образцов $N_к$, которое пробилось при напряжениях, лежащих в этом интервале.

Для каждого интервала находят также, какую долю $P_к$ от общего количества образцов составляет число $N_к$ образцов, пробитых в данном интервале:

$$P_к = \frac{N_к}{N}. \qquad (8)$$

Откладывая по оси абсцисс напряжение $\overline{U}_к$, а по оси ординат — величину $P_к$, получают кривую, изображающую функцию распределения[1] (рис. 15,*а*, 16,*а*):

$$P_к = f(\overline{U}_к). \qquad (9)$$

Если найти сумму

$$\sum_{k=1}^{k=n} P_к + \overline{U}_к = \overline{U}_{пр}, \qquad (10)$$

то она даст усредненное значение пробивного напряжения.

Для построения интегральной кривой (рис. 15,*б*, 16,*б*) по оси абсцисс откладывают напряжение $\overline{U}_к$, а по оси ординат — число конденсаторов $M_к$ (в процентах к общему количеству испытанных конденсаторов N), пробившихся при напряжениях $\overline{U}_к$ (характеризующих данный интервал K) и при напряжениях более низких:

$$M_к = \frac{\Sigma N_к}{N} 100\%. \qquad (11)$$

Функция распределения характеризует разброс значений пробивного напряжения.

[1] Таким же способом определялся разброс значений емкости, угла диэлектрических потерь и других параметров конденсаторов.

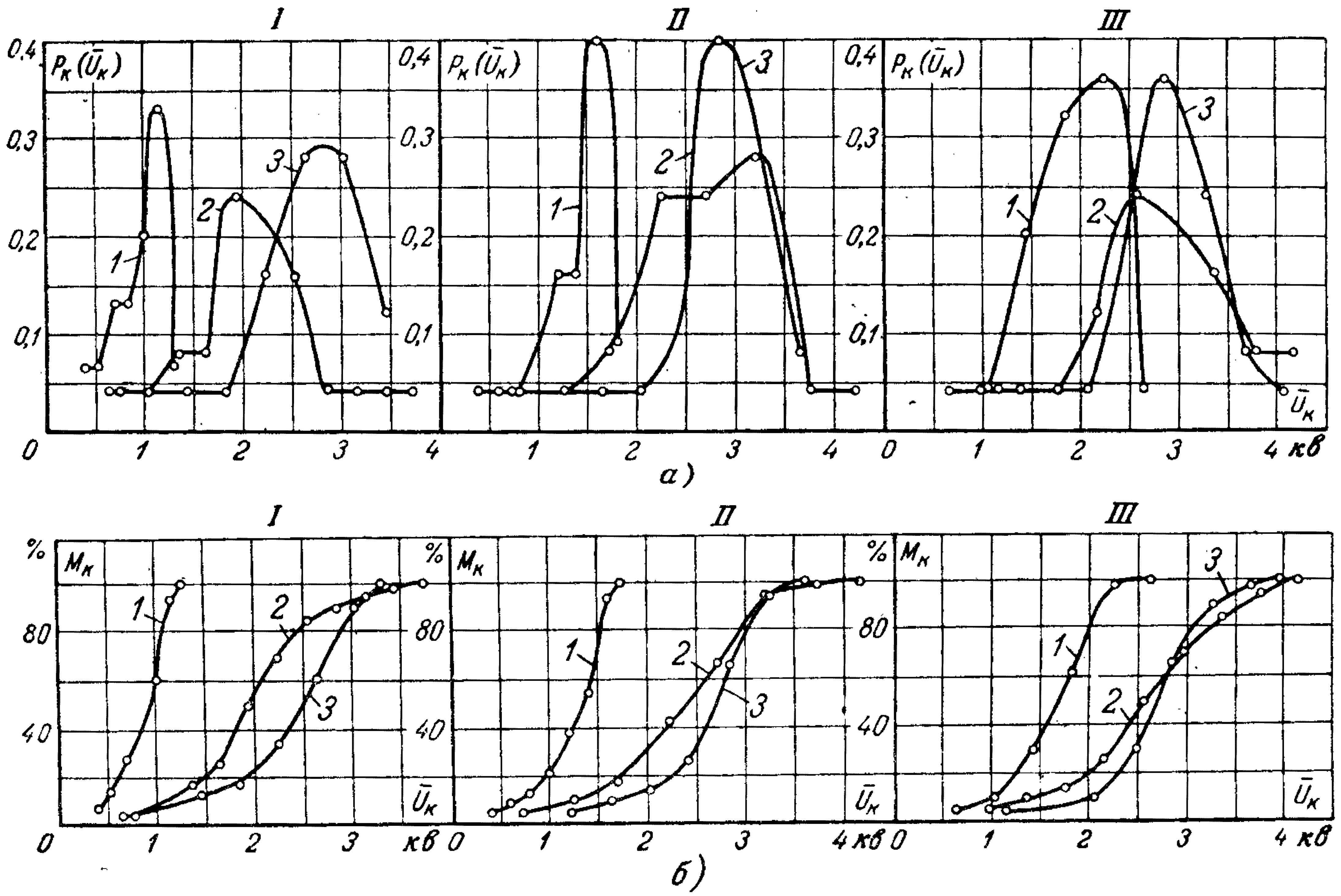


Рис. 15. Функции распределения $P_к = f(\bar{U}_к)$ (*а*); интегральные кривые $M_R = f(U_к)$ (*б*), полученные в результате испытания конденсаторов со сквозными прорезями с толщинами пластин: *I* — Δ=0,2 *мм*; *II* — Δ=0,3 *мм*; *III* — Δ=0,4 *мм*, *1* — СМ-1, *2* — Т-150, *3* — ТК-20.

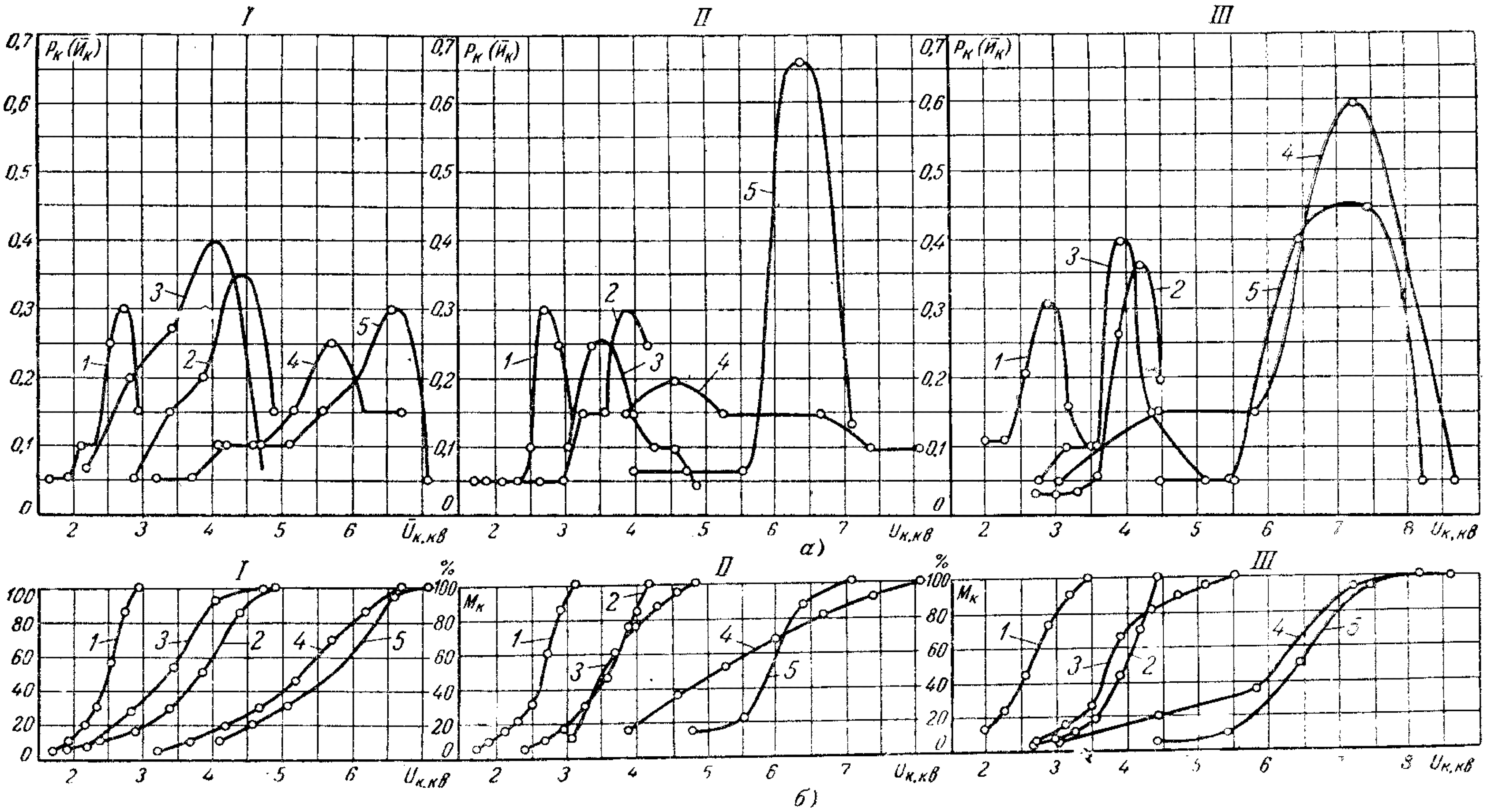


Рис. 16. Функции распределения $P_к = f(U_к)$ (*а*) и интегральные кривые $M_к = f(U_к)$ (*б*), полученные в результате испытания конденсаторов с глухими прорезями с толщинами пластин:

I — $\Delta = 0{,}27$; *II* — $\Delta = 0{,}3$ *мм*; *III* — $\Delta = 0{,}4$ *мм*, *1* — СМ-1; *2* — Т-150; *3* — Т-900; *4* — Т-80; *5* — ТК-20.

По величине $\overline{U}_{пр}$ (рис. 16) производится оценка электрической прочности конденсаторов.

Пользуясь интегральной кривой при выбранном значении $M_к$ (3—5%), находят величину испытательного напряжения.

Из испытаний диэлектриков (рис. 9) и конденсаторов КЛГ (рис. 14) видно, что пробивные напряжения конденсаторов ($\overline{U}_{пр.к}$) пропорциональны пробивным напряжениям их диэлектриков ($\overline{U}_{пр.д}$). Значение коэффициента пропорциональности $\varphi=\overline{U}_{пр.к}/\overline{U}_{пр.д}$ характеризует в какой-то степени эффективность использования диэлектрика (с точки зрения его электрической прочности) в данной конструкции. Для конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями $\varphi=0{,}2\div0{,}4$, а для конденсаторов с глухими прорезями $\varphi=0{,}45\div0{,}65$. Отношение пробивного напряжения $\overline{U}_{пр.к}$ к рабочему $\overline{U}_{р.к}$

Таблица 3

Конструктивное исполнение	Материал диэлектрика	Толщина пластины, *мм*	Рабочее напряжение, *в*	Пробивное напряжение при $M_к = 10\%$, *в*	Коэффициент запаса электрической прочности
Сквозные прорези	ТК-20	0,18 0,36	160 250	1 150 2 000	7,2 8,0
	Т-150	0,18 0,36	160 250	1 000 1 500	6,3 6,3
	СМ-1	0,18 0,36	75 125	350 900	4,7 7,2
Глухие прорези	ТК-20	0,27—0,3 0,3 —0,4	160 250	4 000—4 300 4 300—5 050	25—27 17—22
	Т-80	0,27—0,3 0,3 —0,4	160 250	3 250—3 350 3 350—3 750	20—21 13—14
	Т-150	0,27—0,3 0,3 —0,4	160 250	2 800—2 950 2 950—3 200	17—18 12—13
	Т-900	0,3 —0,32 0,36—0,4	160 250	2 700—2 900 3 000—3 200	17—18 12—13
	СМ-1	0,3 —0,34 0,36—0,4	75 160	2 000 2 000	27 12

характеризует запас электрической прочности конденсатора по отношению к рабочему напряжению:

$$K_{зап} = \frac{\overline{U}_{пр.к}}{\overline{U}_{р.к}}. \qquad (12)$$

По $K_{зап}$ в какой-то мере можно судить о эксплуатационной надежности конденсаторов. Коэффициент запаса определялся отношением пробивных напряжений (рис. 15,*б*, 16,*б*), при которых происходит пробой 10% конденсаторов ($M_к = 10\%$) к их рабочему напряжению (табл. 3). Как видно из табл. 3, у конденсаторов со сквозными прорезями $K_{зап} = 4{,}7 \div 8$, что более чем в 2 раза ниже, чем у конденсаторов с глухими прорезями ($K_{зап} = 12 \div 27$). Поэтому конденсаторы с глухими прорезями, имеющие больший запас по электрической прочности, более надежны в эксплуатации. Надежность конденсаторов с глухими прорезями на порядок выше надежности конденсаторов со сквозными прорезями.

4. ИЗОЛЯЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Изоляционно-защитное покрытие конденсаторов применяется для защиты межэлектродных промежутков и поверхности электродов от воздействия внешних факторов — влаги, загрязнений, механических повреждений и т. п., а также для уменьшения краевого эффекта.

В конденсаторах типа КЛГ применяются три варианта защитных покрытий:

первый (обычный для конденсаторостроения) — органическое изоляционно-защитное покрытие (эмали типа ЭКР, лаки, компаунды);

второй (осуществлен впервые на конденсаторах типа КЛГ) — неорганическое изоляционно-защитное покрытие (стекла, эмали);

третий (применен впервые для конденсаторов КЛГ с «глухими» прорезями) — органическое изоляционно-защитное покрытие только поверхности контактного узла. Межэлектродный промежуток свободен от покрытия, а для предохранения его от увлажнения и загрязнения поверхность керамики полируется.

Для конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями, межэлектродные промежутки которых равны толщине диэлектрика (0,18—0,4 *мм*), обязательно приме-

нение изоляционно-защитного покрытия как с точки зрения защиты конденсаторов от воздействия внешней среды, так и для уменьшения краевого эффекта. Для улучшения изоляционных свойств защитного покрытия наряду с органическими изоляционными лаками, эмалями и компаундами применяются и неорганические стекла [Л. 9].

Таблица 4

Изоляционные покрытия	Параметры изоляционного покрытия				
	ε	$\times 10^{-6}$ ТКЕ, 1/°С	$\times 10^{-4}$ tgδ	*E*, *кв/мм*	$\times 10^{-6}$ КТР, 1/°С
Свинцовое стекло № 69	16,4	553	11	25	8,37
Свинцовое стекло № 74	12,0	140	10	11	7,46
Эмаль ЭКР-50	—	2 400—2 700	—	—	—
Компаунд БФК	—	340	100	—	—

От свойств изоляционного покрытия существенно зависят емкость, температурный коэффициент емкости, диэлектрические потери, электрическая прочность, влагостойкость и надежность конденсаторов.

Параметры некоторых изоляционных материалов приведены в табл. 4. Из этой таблицы видно, что по электроизолирующим свойствам нужно отдать предпочтение неорганическим стеклам, которые в свою очередь уступают керамическим диэлектрикам (см. табл. 1).

У конденсаторов, расстояние между электродами которых защищено изоляционным покрытием, как результат краевого эффекта появится некоторая дополнительная емкость, величина которой зависит от диэлектрической проницаемости изоляционного материала, толщины его слоя и расстояния между электродами. При использовании в качестве изоляционного покрытия (толщиной 0,25—0,5 *мм*) смеси свинцовых стекол № 69 и 74 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=13$ емкость конденсаторов с толщиной пластин 0,2—0,5 *мм* увеличивается примерно на 3—6%. Наличие дополнительной емкости с положительным температурным коэффициентом приводит к изменению ТКЕ конденсатора. Особенно заметны изменения ТКЕ конденсатора при использовании органических эмалей типа ЭКР-50, ТКЕ которых

равно примерно $2500 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (табл. 4). Из табл. 5 видно, что с увеличением толщины слоя эмали ЭКР-50 уменьшается абсолютное значение температурного коэффициента емкости конденсатора группы М47. Применение в качестве покрытия эмалей ЭКР приводит к существенным изменениям ТКЕ конденсаторов группы М47 и М75 (табл. 6). Покрытие этих конденсаторов компаундом БФК и стеклами не вызывает заметных изменений ТКЕ.

Таблица 5

Группа ТКЕ	$\times 10^{-6}$ ТКЕ, °С$^{-1}$, КЛГ в интервале температур от 30 до 70 °С		
	Не покрытых эмалью ЭКР-50	При двухкратном покрытии эмалью ЭКР-50	При трехкратном покрытии эмалью ЭКР-50
М47	—50	—21,0	—3,0

Рассмотрим влияние дополнительной емкости, возникающей при нанесении защитного покрытия на диэлектрические потери конденсаторов. Известно, что при параллельном соединении емкостей результирующий угол диэлектрических потерь может быть выражен через

Таблица 6

Группа ТКЕ	$\times 10^{-6}$ ТКЕ, °С$^{-1}$, КЛГ в интервале температур от 30 до 70 °С			
	Без покрытия	Покрытых эмалью ЭКР	Покрытых компаундом БФК	Покрытых стеклом № 74
М47	—61,5	—45,0	—60,6	—67,0
М75	—80	—67	—76,0	—
М700	—713	—560	—751	—
М1300	—1 485	—1 360	—1 410	—

углы потерь этих конденсаторов $\operatorname{tg} \delta_к$ и $\operatorname{tg} \delta_{доп}$ и их емкости $C_к$ и $C_{доп}$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_к C_к + \operatorname{tg} \delta_{доп} C_{доп}}{C_к + C_{доп}}. \tag{13}$$

Следовательно, чем больше дополнительная емкость и диэлектрические потери защитного изоляционного слоя, тем больше должны быть диэлектрические потери конденсатора. В табл. 7 приведены значения диэлектрических потерь конденсаторов типа КЛГ групп ТКЕ М47,

Таблица 7

Группа ТКЕ	Изоляционное покрытие	× 10^{-4} tg δ		
		при 20° С	при 150° С	После увлажнения [1]
М47	Без покрытия	4,5	8,5	9,3
	Эмаль ЭКР-50	5,9	17,2	7,15
	Компаунд БФК	4,3	11,2	8,3
	Стекло	4,4	10,1	3,1
М700	Без покрытия	5,2	8,0	7,4
	Эмаль ЭКР-1	9,6	11,5	10,1
	Компаунд БФК	6,4	7,6	7,5
М1300	Без покрытия	4,2	4,4	3,2
	Эмаль ЭКР-1	4,4	6,2	—
	Компаунд БФК	4,3	4,4	5,2

[1] После пребывания в среде с относительной влажностью 98% и температуре 40° С в течение 98 *ч* и выдержке конденсаторов в нормальных климатических условиях в течение 2 *ч*.

М700 и М1300, у которых в качестве защитных изоляционных покрытий использовались эмали ЭКР, компаунд БФК и стекло № 74. Для сравнения даны также параметры конденсаторов без изоляционного покрытия. Из табл. 7 можно сделать вывод, что эмали ЭКР увеличивают диэлектрические потери конденсаторов типа КЛГ особенно при повышенной температуре, а компаунд БФК и стекло № 74 почти их не изменяют.

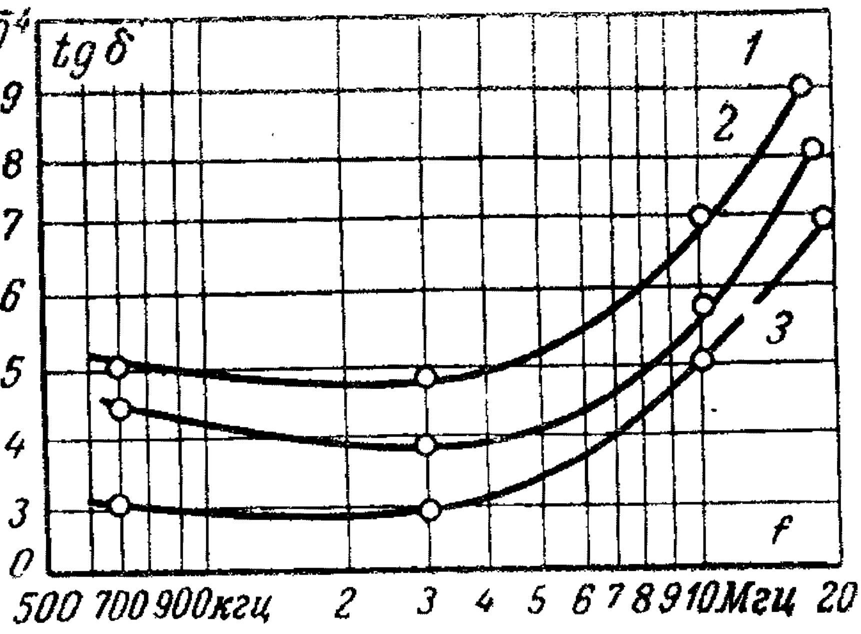


Рис. 17. Частотная зависимость угла диэлектрических потерь конденсаторов типа КЛГ группы ТКЕ М47.

1 — эмаль ЭКР-50; *2* — стекло; *3* — без изоляционного покрытия.

На рис. 17 показана зависимость диэлектрических потерь конденсаторов группы ТКЕ М47 от частоты при различных изоляционных покрытиях. Из рисунка очевидно, что диэлектрические потери конденсаторов группы М47 в функции частоты не зависят от материала изоляционного покрытия.

Для конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями, у которых межэлектродные расстояния равны толщине керамического диэлектрика, электрическая прочность в значительной степени зависит от свойств материала и толщины слоя защитного покрытия (табл. 8). Из этой таблицы видно, что изоляционные покрытия значительно увеличивают пробивные напряжения конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями. Максимальные значения пробивных напряжений при 20° С наблюдаются у конденсаторов, покрытых эмалью ЭКР-50, а при 150° С — у конденсаторов, покрытых смесью стекла № 69 и 74. Низкие пробивные напряжения конденсаторов без защитного покрытия объясняются тем, что в этом случае резче сказывается краевой эффект.

Таблица 8

Материал диэлектрика	Толщина диэлектрика *мм*	Пробивное напряжение установленных КЛГ со сквозными прорезями, *в*							
		Без покрытия		Покрытых смесью стекла № 74 и 69		Покрытых эмалью ЭКР-50		Покрытых компаундом БФК	
		при 20° С	при 150° С	при 20° С	при 150° С	при 20° С	при 150° С	при 120° С	при 150° С
ТК-20	0,2	927	873	2 618	2 166	3 134	2 091	2 087	2 000

О влагозащитных свойствах изоляционных покрытий можно судить по результатам испытания конденсаторов напряжением в среде с повышенной относительной влажностью. Находясь в течение 100 *ч* под напряжением 0,5 $U_н$ при относительной влажности среды 98% при температуре 40° С, конденсаторы со сквозными прорезями и органическим изоляционным покрытием пробиваются в количестве 21%, те же конденсаторы, покрытые свинцовым стеклом, в тех же условиях пробиваются в количестве 13,5%. Причиной пробоя во всех случаях следует считать наличие дефектов на границе раздела изоляционное покрытие — керамический диэлектрик, а также недостаточную влагостойкость органического изоляционного покрытия.

На примере конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями показано влияние изоляционного покрытия

на параметры этих конденсаторов. На основании полученных данных можно заключить, что защитное изоляционное покрытие увеличивает электрическую прочность конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями, но вместе с тем увеличивает также диэлектрические потери этих конденсаторов и смещает значение температурного коэффициента емкости, особенно в случае применения эмалей типа ЭКР. С точки зрения влагостойкости конденсаторов, защищенных различными изоляционными покрытиями, лучшие результаты получены на конденсаторах с защитно-изоляционным покрытием в виде неорганических стекол. Однако влагостойкость этих конденсаторов уже не отвечает современным требованиям.

Защитным изоляционным покрытием конденсаторов типа КЛГ с глухими прорезями служит по существу тот же керамический материал, который используется в качестве диэлектрика этих конденсаторов, и выполнено оно как одно целое с диэлектриком.

5. ПАРАМЕТРЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Основными параметрами конденсаторов (табл. 9), определяющими их эксплуатационные возможности, являются емкость, добротность, сопротивление изоляции, электрическая прочность, механическая прочность и надежность. В свою очередь перечисленные параметры характеризуются условиями эксплуатации, а именно: температурой, влажностью, давлением окружающей среды, продолжительностью эксплуатации, величиной и родом электрической и механической нагрузок.

Номинальное значение емкости конденсаторов типа КЛГ может быть получено от 20 до 33 000 *пф*. Этим конденсаторам присуща стабильность емкости во времени и температурная цикличность. Их емкость практически не изменяется как в условиях длительного хранения, так и после многократного последовательного воздействия пониженной и повышенной температур. Отклонения емкости конденсаторов типа КЛГ, измеряемые до и после трех температурных циклов с резким изменением температуры от —60 до +150° С, характеризуются кривыми, приведенными на рис. 18. Температурная стабильность емкости конденсаторов групп М47, М75,

М700 и М1300 определяется величиной их температурного коэффициента емкости ТКЕ. Для керамических конденсаторов, диэлектриком которых служит материал с малым коэффициентом термического расширения (8—10 миллионных на 1° С), ТКЕ практически равен температурному коэффициенту диэлектрической проницаемости их диэлектрика (ТКε). Номинальное значение ТКЕ конденсаторов типа КЛГ групп М47, М75, М700 и М1300 составляет от 47 до 1300 миллионных на 1° С.

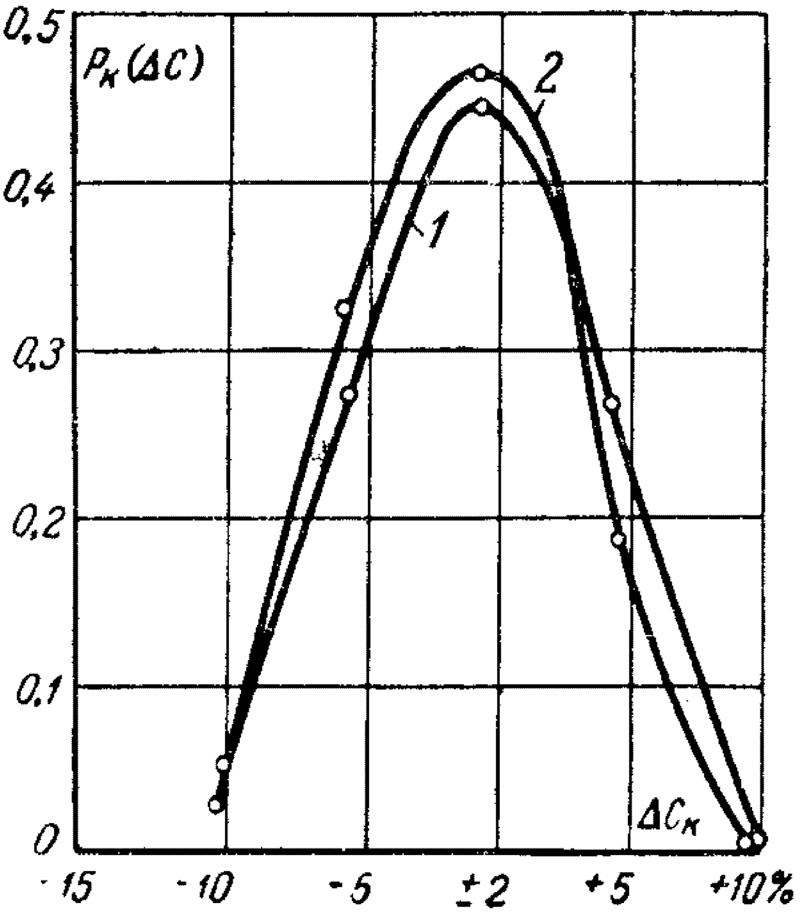


Рис. 18. Функции распределения отклонения емкости от номинального значения конденсаторов типа КЛГ групп М47, М75, М700 и М1300, полученные по результатам измерения емкости.

1 — до испытания температурными циклами; *2* — после испытания тремя температурными циклами от —60 до +150° С.

Как уже отмечалось, в качестве диэлектриков конденсаторов были использованы материалы с отрицательным ТКЕ. Отклонения ТКЕ конденсаторов от номинального значения характеризуются кривыми, приведенными на рис. 19. Стабильность емкости конденсаторов перечисленных групп характеризуется также отсутствием скачкообразного изменения их емкости или эффекта мерцания [Л. 14] (табл. 10). Конденсаторы типа КЛГ названных групп ТКЕ при номинальном напряжении практически не мерцают (табл. 10).

Конденсаторы групп Н40 и Н70 относятся к категории сегнетокерамических [Л. 13]. Диэлектриком этих конденсаторов служит материал со сверхвысокой диэлектрической проницаемостью (1 000—3 000). Емкость таких конденсаторов резко изменяется с изменением температуры (см. рис. 5). Стабильность диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсаторов групп М47, М75, М700 и М1300 позволяет получить номинальные значения емкостей этих конденсаторов с точностью от ±2 до ±10%. Номинальные значение емкостей кон-

Таблица 9а

Конструктивное исследование	Тип конденсатора по напряжению	Толщина пластин, *мм*	Габаритные размеры, *мм*			Предельные значения емкости, *пф*, конденсаторов КЛГ групп ТКЕ					
			L	*h*	*a*	М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Сквозные прорези	КЛГ-1 75 *в*	0,15—0,18	4	4,0	4	—	—	—	—	—	10 000
			5	4,0	5	—	—	—	—	—	15 000
			8	4,0	6	—	—	—	—	—	22 000
			10	4,0	6	—	—	—	—	—	33 000
	КЛГ-2 160 *в*	0,15—0,18	4	4,0	4	91	100	240	470	2 200	3 300
			5	4,0	5	180	200	470	910	4 700	6 800
			8	4,0	6	270	270	680	1 300	6 800	10 000
			10	4,0	6	360	360	1 000	1 800	10 000	15 000
	КЛГ-3 250 *в*	0,36	4	4,0	4	43	47	110	200	1 000	—
			5	4,0	5	75	82	200	390	1 500	—
			8	4,0	6	91	100	240	510	2 200	—
			10	4,0	6	130	150	360	680	3 300	—
Глухие прорези	КЛГ-1 75 *в*	0,3	4	4,0	5,0	—	—	—	—	—	10 000
			6	4,0	5,0	—	—	—	—	—	15 000
			8	4,0	5,0	—	—	—	—	—	22 000
			10	4,0	5,0	—	—	—	—	—	33 000

КЛГ-2 160 *в*	0,27—0,3	4	4,0	5,0	130	130	300	680	3 300	6 800
		6	4,0	5,0	180	200	470	1 100	4 700	10 000
		8	4,0	5,0	270	270	750	1 500	6 800	15 000
		10	4,0	5,0	360	360	1 000	2 000	10 000	22 000
КЛГ-3 250 *в*	0,3—0,4	4	4,0	5,0	100	100	200	360	1 500	—
		6	4,0	5,0	130	130	300	560	2 200	—
		8	4,0	5,0	200	200	470	750	3 300	—
		10	4,0	5,0	270	270	680	1 000	4 700	—

Таблица 9б

Параметры конденсаторов КЛГ	Группы ТКЕ					
	М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Температурный коэффициент емкости $\times 10^{-6}$ ТКЕ, 1/°С	—47	—75	—700	—1 300	Не нормируется	Не нормируется
Добротность Диапазон частот, *Мгц*	1 000—2 000 0,5—3	1 000—2 000 0,5—3	1 000—1 600 0,5—3	1 000—2 500 0,5—3	500—1 000 0,001	50—100 0,001
Сопротивление, *ом*	10^{11}—11^{12}	10^{11}—10^{12}	10^{10}—10^{11}	10^{11}—10^{12}	10^{10}—10^{11}	10^{9}—10^{10}

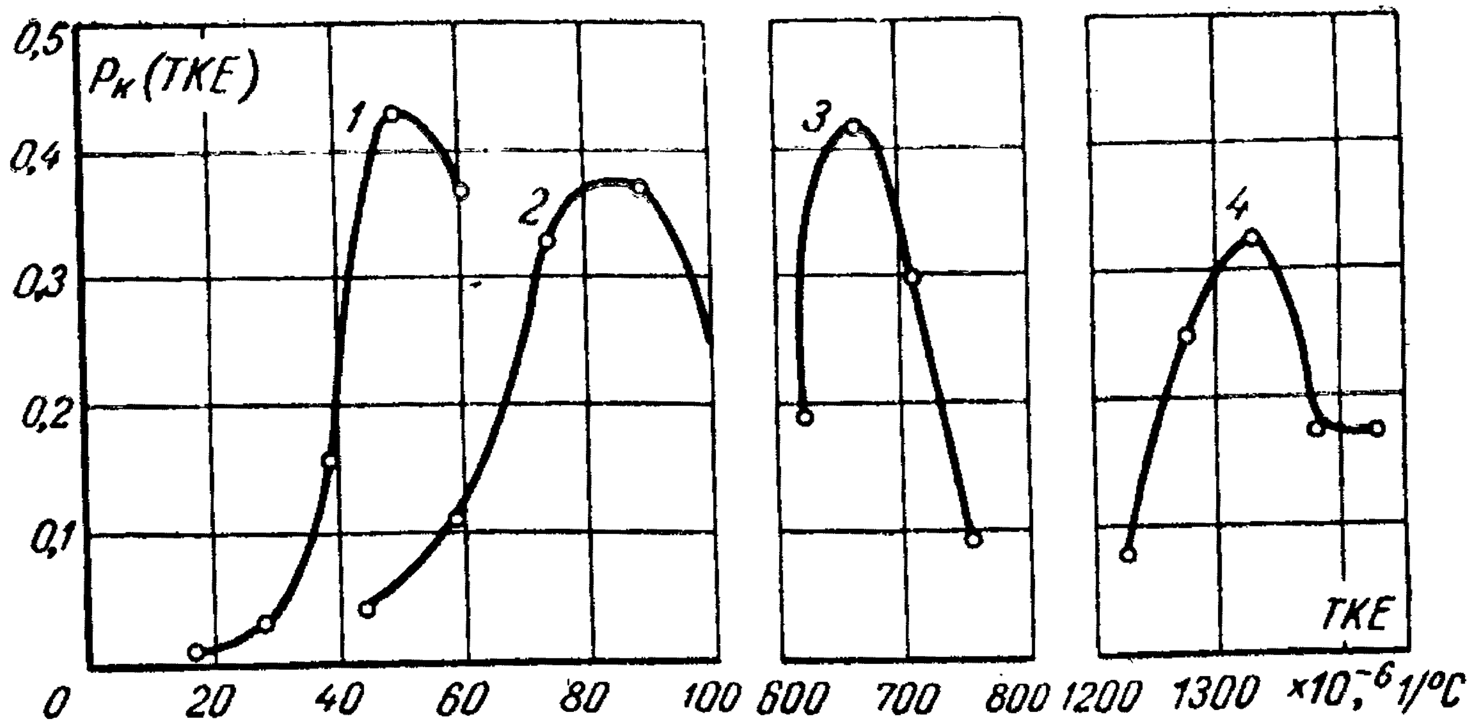


Рис. 19. Функции распределения температурного коэффициента емкости (ТКЕ), полученные по результатам измерения ТКЕ конденсаторов в диапазоне температур от 30 до 70° С групп.
1 — М47; 2 — М75; 3 — М700; 4 — М1300.

денсаторов групп Н40 и Н70 вследствие резкого изменения диэлектрической проницаемости их диэлектрика с изменением температуры могут быть получены соответственно с точностью ±20 и —20÷+50%.

Таблица 10

Конструктивное исполнение[2]	Группа ТКЕ	Количество конденсаторов, мерцающих[1] при различных напряжениях, %			
		100 *в*	200 *в*	300 *в*	500 *в*
КЛГ с глухими прорезями	М47	0	0	—	—
	М75	0	0	—	—
	М700	0	0	—	—
	М1300	0	0	—	—
КЛГ со сквозными прорезями, остеклованные	М47	0	0	0	0
	М75	0	0	0	0
	М100	0	0	0	20
	М1300	5	5	35	80
КЛГ со сквозными прорезями и органическим покрытием	М47	0	0	—	—
	М75	0	0	—	—
	М700	0	0	—	—
	М1300	10	15	52	91

[1] Испытания проводились на приборе ИСК-4.
[2] Конденсаторы типа КЛГ-2 на 160 *в*.

Для колебательных контуров малой мощности решающее значение имеет величина добротности (Q) конденсаторов. Величина, обратная добротности,— тангенс угла диэлектрических потерь — служит характеристикой потерь мощности, которая под действием переменного электрического поля рассеивается в конденсаторе [Л. 17] и вызывает дополнительные затухания колебательного контура. Мощность потерь конденсатора $P_{пот}$ определяется эффективным значением приложенного к его электродам напряжения $U_{эфф}$, частотой $\omega = 2\pi f$, емкостью C и тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ или добротностью Q:

$$P_{пот} = U_д^2 \omega C \operatorname{tg}\delta \qquad (14)$$

или

$$P_{пот} = U_д^2 \omega C \frac{1}{Q}. \qquad (15)$$

Большая добротность керамических конденсаторов групп М47, М75, М700 и М1300, в частности КЛГ (табл. 9), и ее частотная стабильность (рис. 20,*а*) позволяют использовать эти конденсаторы в колебательных контурах высокой частоты. Добротность конденсаторов групп Н40 (рис. 20,*б*) и Н70 резко уменьшается с увеличением частоты. Для конденсаторов групп М47, М75, М700, М1300 характерна температурная стабильность добротности в диапазоне температур от —60° до +125—155° С (рис. 21,*а*, 22,*а*). Для конденсаторов групп Н40 и Н70 характерно резкое уменьшение добротности в области отрицательных температур и увеличение ее с ростом температуры (рис. 21,*б*, 22,*б*, *в*).

Сопротивление изоляции керамических конденсаторов, в частности КЛГ, очень велико и достигает значений 10^{12}—10^{13} *ом* (табл. 9, рис. 23). Измерение сопротивления изоляции сводится к измерению тока проводимости при постоянном значении напряжения. Условно принято отсчитывать значение тока проводимости через 1 *мин* после включения на конденсатор напряжения. Это значение обычно много больше установившейся величины. С увеличением температуры удельное объемное сопротивление изоляции (керамических диэлектриков) резко уменьшается (рис. 8), соответственно сопротивле-

ния изоляции конденсаторов смещаются в сторону меньших значений (рис. 23). Зависимость сопротивления

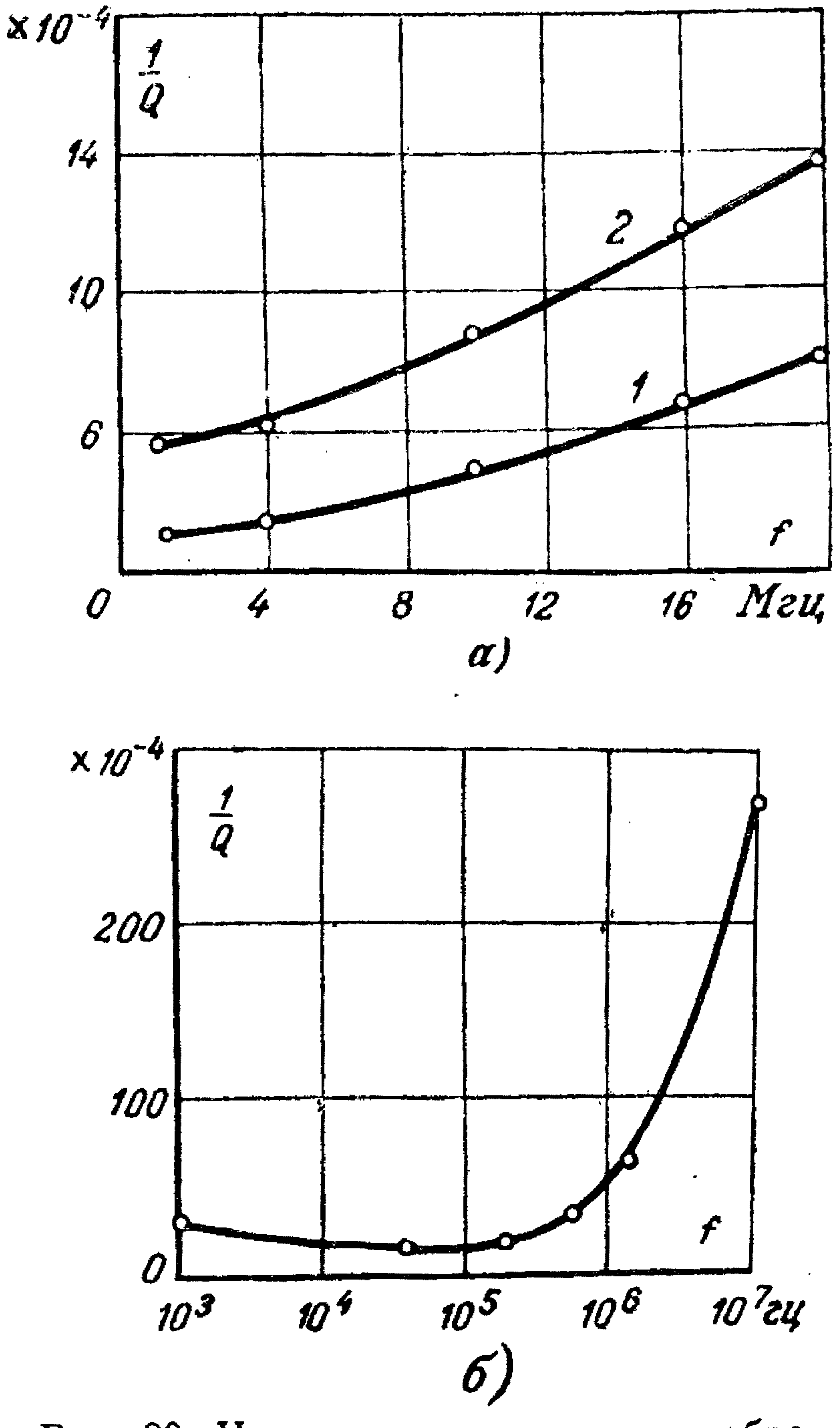


Рис. 20. Частотная зависимость добротности конденсаторов типа КЛГ при температуре 20° С.

а — группы М47; М700, М75, М1300; *1* — минимальное значение; *2* — максимальные значения; *б* — группа Н40.

изоляции от температуры может быть выражена эмпирической формулой [Л. 15].

$$\lg R_2 = \lg R_1 - \beta (t_2 - t_1), \qquad (16)$$

где R_1 — сопротивление изоляции при температуре t_1, *Мом*;

R_2 — сопротивление изоляции при температуре t_2, *Мом*.

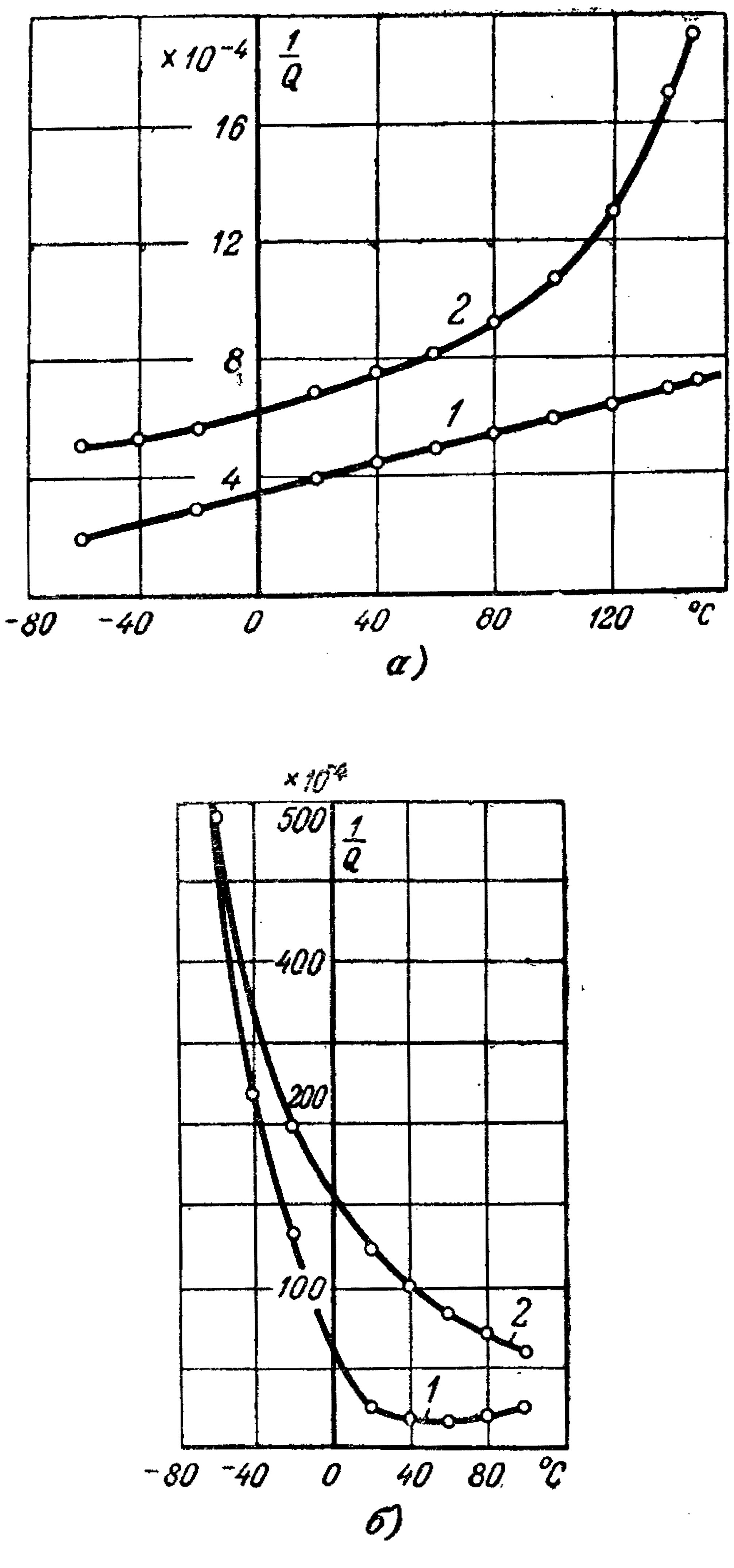


Рис. 21. Температурная зависимость добротности конденсаторов типа КЛГ.

а — группы М47, М75, М700, М1300 при частоте 0,5—3 *Мгц*: *1* — минимальное значение; *2* — максимальное значение; *б*: *1* — группа Н40, *2* — группа Н70 при частоте 1 000 *гц*.

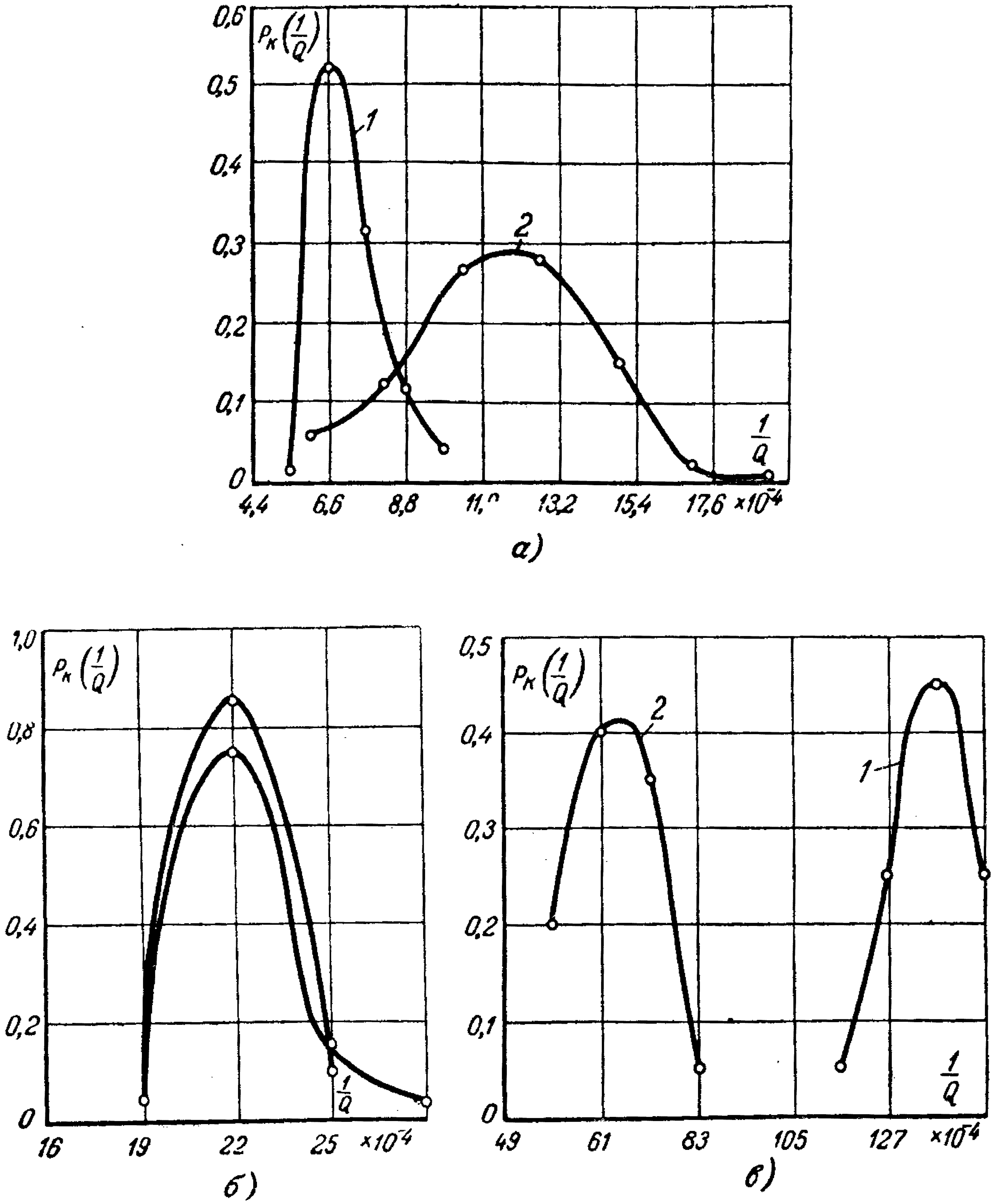


Рис. 22. Функции распределения добротности конденсаторов типа КЛГ.

а — группы М47, М75, М700, М1300; *б* — группа Н40; *в* — группа Н70; *1* — в нормальных климатических условиях; *2* — при максимально допустимых температурах для каждой из групп.

Значения коэффициента β для конденсаторов типа КЛГ приведены в табл. 11. Измерение сопротивления изоляции проводилось при напряжении 100 *в*. Значение

t_2 соответствовало максимально допустимой температуре для данной группы конденсаторов (табл. 16).

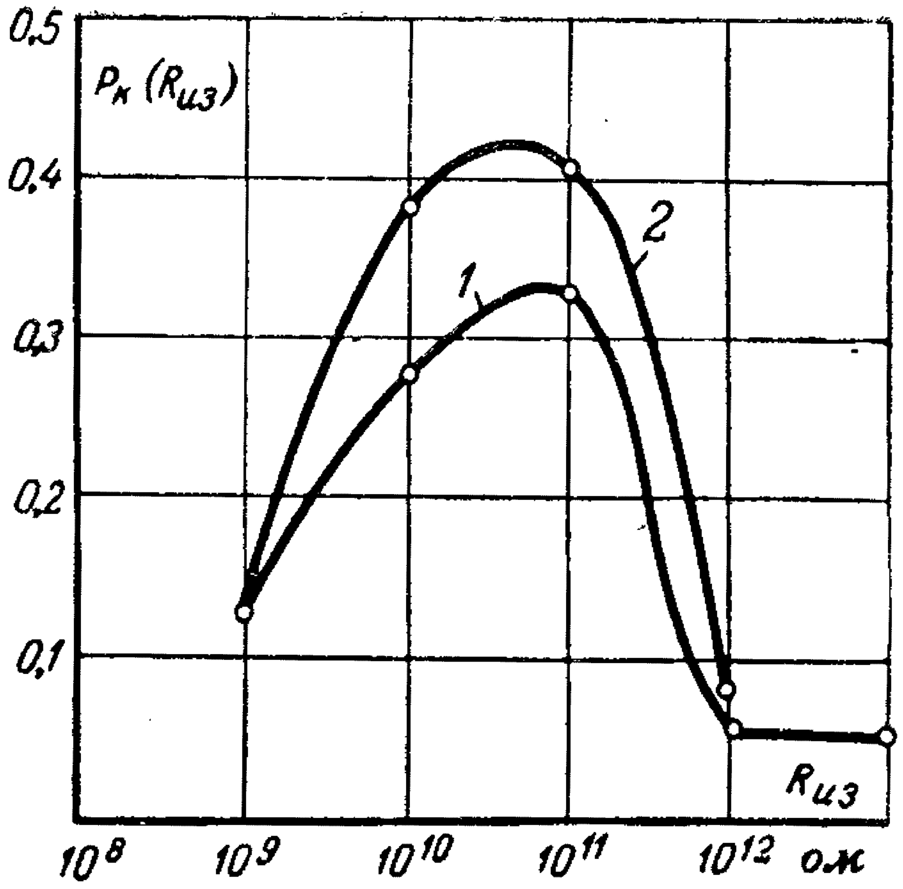


Рис. 23. Функции распределения сопротивления изоляции конденсаторов типа КЛГ, построенные по результатам измерения сопротивления изоляции в нормальных условиях (*1*) и при максимально допустимых температурах (*2*) для каждой из групп.

Электрическая прочность конденсатора характеризуется как величиной напряжения или градиента электрического поля, при котором происходит пробой или разрушение конденсатора, так и предельно допустимой величиной рабочего напряжения. Значения пробивных градиентов конденсаторов типа КЛГ приведены в табл. 12. Минимальные значения пробивных градиентов соответствуют толщине диэлектрика, равной 0,4 *мм*, а максимальные — 0,2 *мм*. Рабочие напряжения этих конденсаторов и соответствующие им градиенты даны в табл. 13. Электрическая прочность конденсаторов существенно снижается с понижением атмосферного давления. Значения напряжения перекрытия конденсаторов типа КЛГ всех трех конструктивных вариантов при остаточном давлении 5—10 *мм рт. ст.* оказались близкими, поэтому в табл. 14 совмещены результаты испытания всех видов конденсаторов, с глухими и со сквозными прорезями.

Таблица 11

Группы ТКЕ	Значение коэффициента β в формуле [16]
М47	0,0077
М75	0,01
М700	0,016
М1300	0,01
Н40	0,0134
Н70	0,0182

Механическая прочность конденсаторов типа КЛГ характеризуется значением разрушающего статического усилия (рис. 24), приложенного вдоль выводов конденсатора, и значением предельно допустимых механических нагрузок: вибрационных, ударных и центробежных (табл. 15). Предельные значения

температуры конденсаторов типа КЛГ даны в табл. 16.

Возможность эксплуатации конденсаторов при различном сочетании предельных нагрузок, а также в тех или иных климатических условиях зависит от стабильности их параметров в этих условиях и надежности. Результаты испытания конденсаторов типа КЛГ номинальным напряжением в сочетании с предельным значением положительной температуры (рис. 25, 26) показали, что параметры конденсаторов за 1 000 *ч* практически не изменились, что свидетельствует об отсутствии старения конденсаторов. Исключение составляют конденсаторы с органическим изоляционным покрытием, у небольшого количества которых уменьшилась добротность.

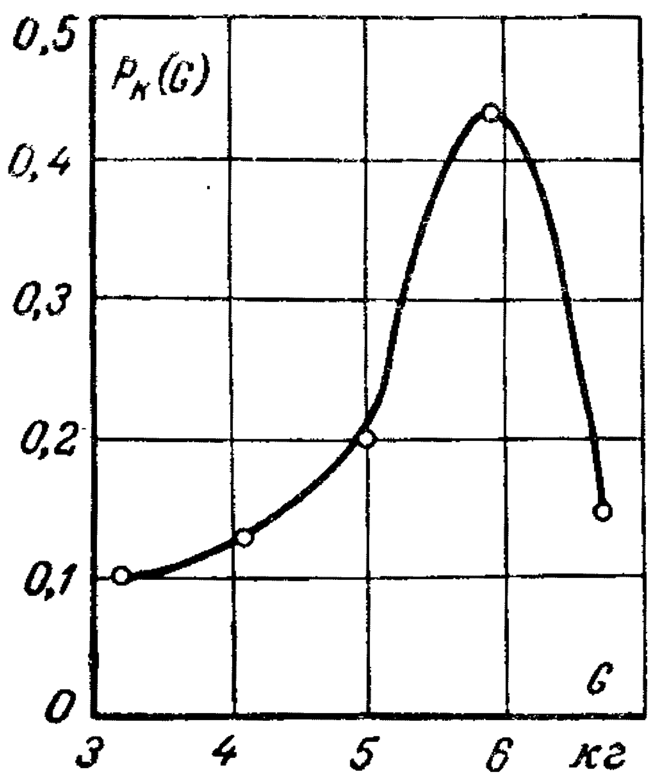


Рис. 24. Функция распределения разрушающего статического усилия, приложенного вдоль выводов конденсаторов типа КЛГ.

Результаты испытания конденсаторов типа КЛГ с глухими прорезями номинальным напряжением в течение 350 *ч*, а конденсаторов со сквозными прорезями без электрической нагрузки в течение 100 *ч* в среде с относительной влажностью 98% и температурой 40° С приведены на рис. 25—27. Измерение параметров производилось непосредственно после окончания испытания, без «подсушки», а для конденсаторов со сквозными

Таблица 12

Конструктивное исполнение[1]	Пробивные градиенты КЛГ, *кв/мм*, групп ТКЕ					
	М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Глухие прорези	17—25	17—25	16—20	11,2—14	11—15	6,7—10
Сквозные прорези	7,4—12,5	—	—	7,2—10,7	—	4,7—5

[1] Толщина диэлектрика 0,2—0,4 *мм*.

Таблица 13

Конструктивное исполнение	Тип конденсаторов по напряжению	Рабочие градиенты КЛГ, в, групп ТКЕ					
		М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Глухие прорези	КЛГ-1, 70 *в*	—	—	—	—	—	240
	КЛГ-2, 160 *в*	530—600	530—600	530—600	500—590	530	400—450
	КЛГ-3, 250 *в*	630—830	630—830	630—830	630—780	630	—
Сквозные прорези	КЛГ-1, 70 *в*	—	—	—	—	—	390
	КЛГ-2, 160 *в*	890	890	890	890	890	480
	КЛГ-3, 250 *в*	670	670	670	670	670	—

Таблица 14

Напряжения перекрытия КЛГ[1] при 10 *мм рт. ст.* групп ТКЕ					
М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
0,640	0,650	0,600	0,590	—	0,550

[1] Толщина диэлектрика 0,2—0,3 *мм.*

прорезями еще дополнительно через 2 *ч* после пребывания их в нормальных условиях. Полученные результаты свидетельствуют о стабильности параметров конденсаторов с глухими прорезями в условиях повышенной влажности. Эти конденсаторы могут использоваться в аппаратуре, не имеющей специальной влагозащиты. Воздействие среды с относительной влажностью 98% и температурой 40° С на конденсаторы со сквозными прорезями приводит к заметному, особенно для конденсаторов с органическим изоляционным покрытием, смещению их параметров. Однако в нормальных условиях по истечении 2 *ч* их параметры приближаются

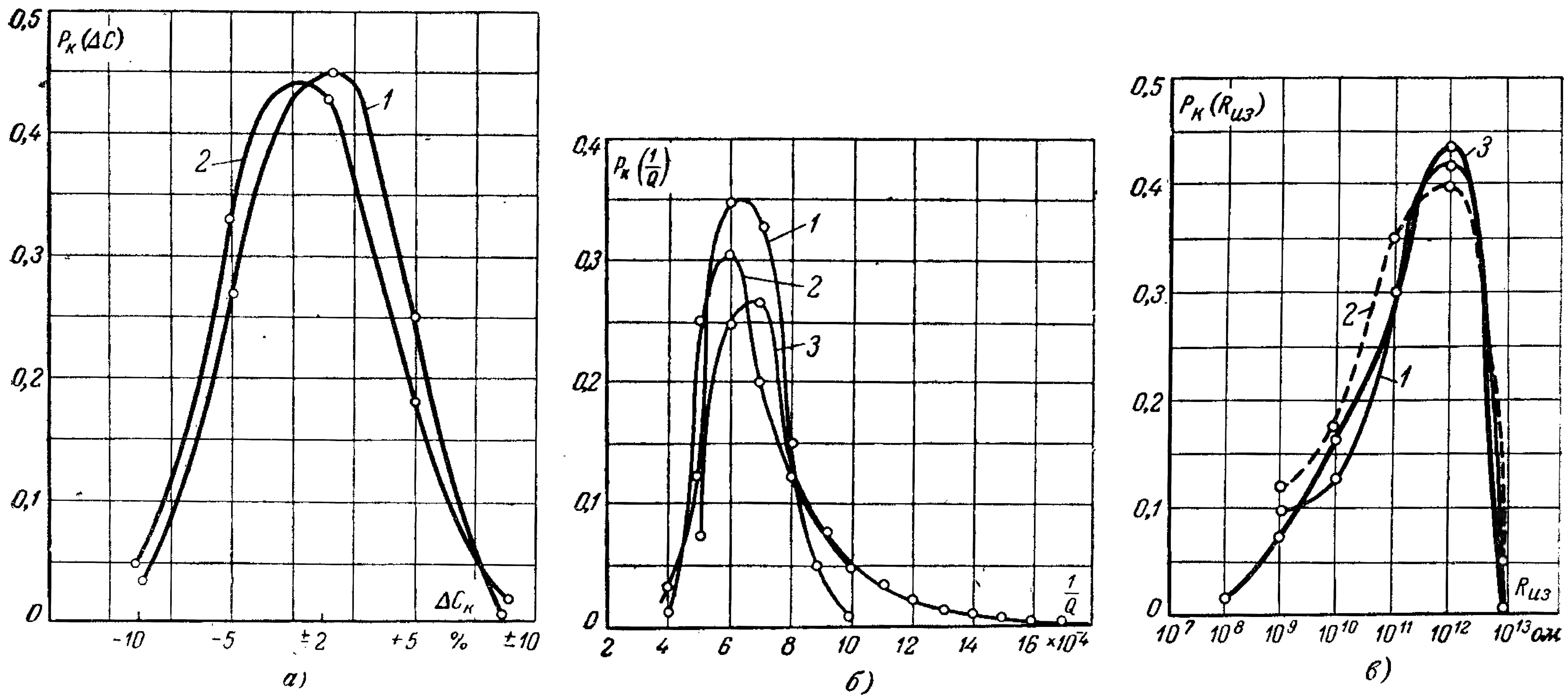


Рис. 25. Параметры конденсаторов типа КЛГ с глухими прорезями.

Функции распределения: *а* — отклонения емкости групп М47, М75, М700, М1300; *б* — добротности групп М47, М75, М700, М1300; *в* — сопротивления изоляции всех групп, построенные по результатам измерения: *1* — в нормальных условиях; *2* — после испытания в течение 1 000 *ч* рабочим напряжением (постоянный ток), при максимальной рабочей температуре для каждой из групп; *3* — после испытания (постоянный ток) конденсаторов рабочим напряжением в условиях относительной влажности 98% и $t=40°$ С в течение 250 *ч*.

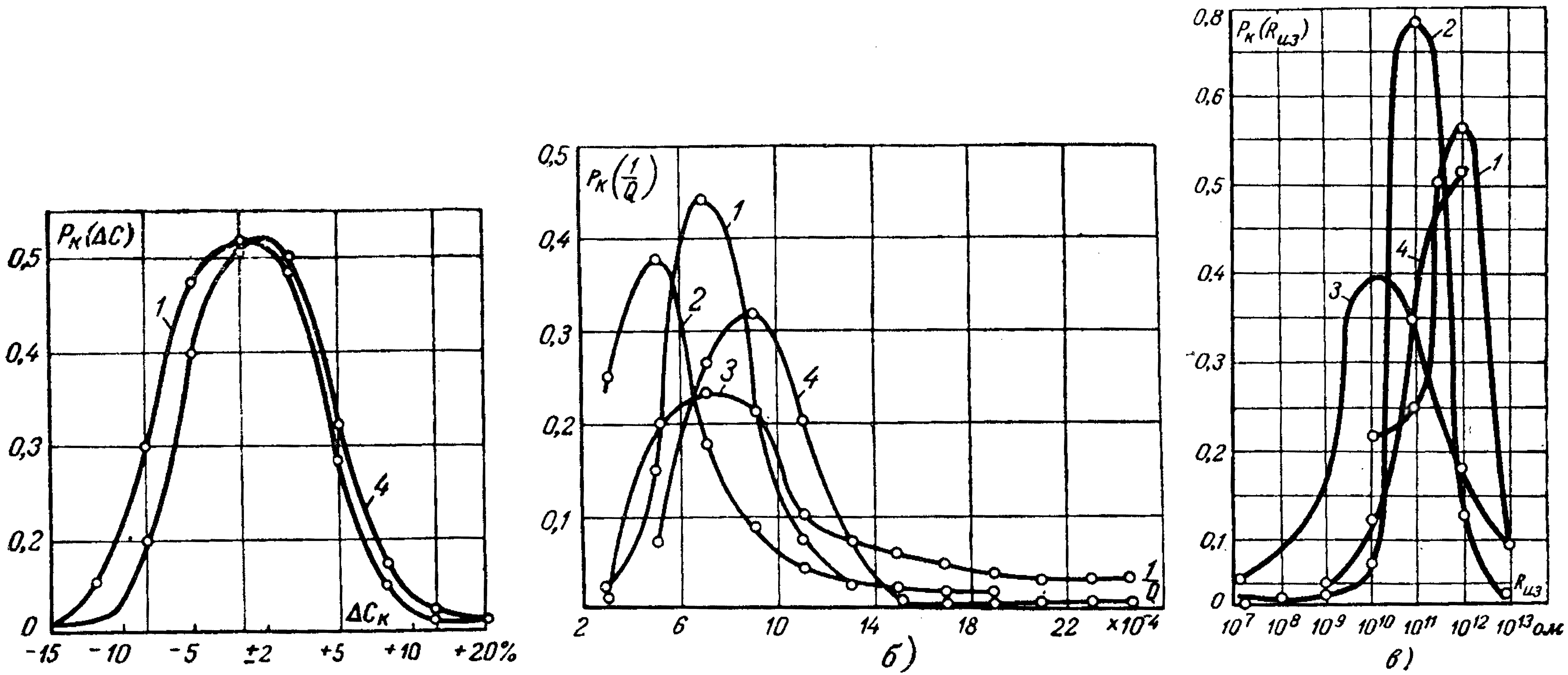
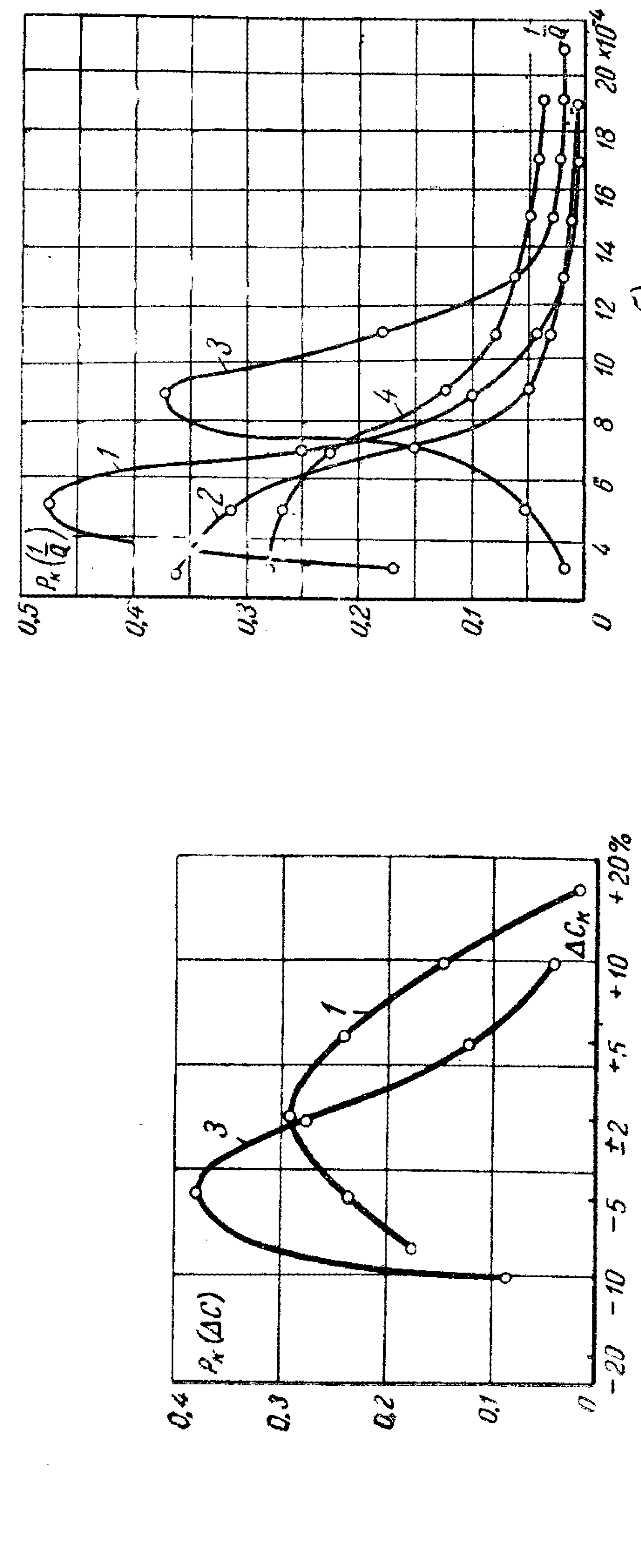


Рис. 26. Параметры конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями и неорганическим изоляционным покрытием.

Функции распределения: *а* — отклонения емкости групп М47, М75, М700, М1300; *б* — добротности групп М47, М75, М700, М1300; *в* — сопротивления изоляции всех групп, построенные по результатам измерения: *1* — в нормальных условиях; *2* — после испытания в течение 1 000 *ч* рабочим напряжением (постоянный ток) при максимально допустимой для каждой из групп температуре; *3* — после выдержки конденсаторов в течение 96 *ч* в условиях относительной влажности 98% и $t=40°$ С; *4* — после испытания конденсаторов в течение 96 *ч* в условиях относительной влажности 98% и $t=40°$ С с предварительной выдержкой после испытания в течение 2 *ч* в нормальных условиях.


$P_к(\frac{1}{Q})$
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
4
6
8
10
12
14
16
18
20 ×10⁻⁴
$\frac{1}{Q}$
1
2
3
4
б)
$P_к(\Delta C)$
0,4
0,3
0,2
0,1
0
−20
−10
−5
±2
+5
+10
+20%
$\Delta C_к$
1
3
а)

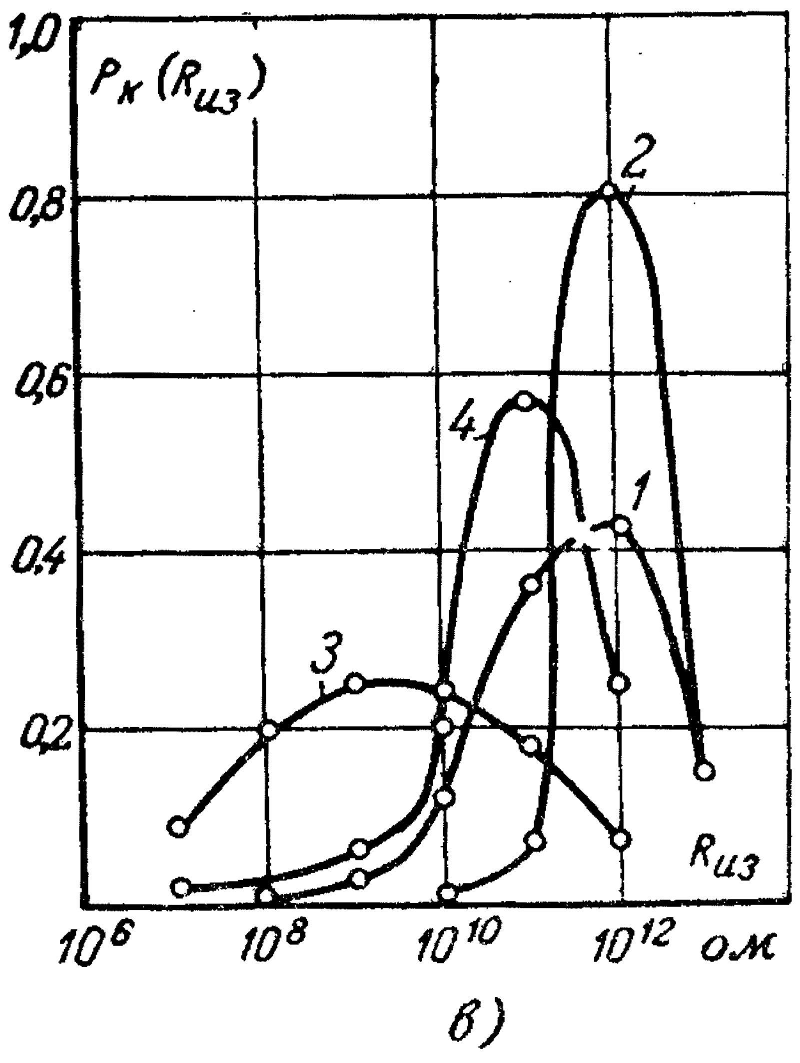


Рис. 27. Параметры конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями и органическим изоляционным покрытием.

Функции распределения: *а* — отклонения емкости групп М47, М75, М700, М1300; *б* — добротности групп М47, М75, М700, М1300; *в* — сопротивления изоляции всех групп, построенные по результатам измерения: *1* — в нормальных условиях; *2* — после испытания в течение 1 000 *ч* рабочим напряжением (постоянный ток) при максимально допустимой для каждой из групп температуре; *3* — после выдержки конденсаторов в течение 96 *ч* в условиях относительной влажности 98% и t=40° С; *4* — после выдержки конденсаторов в течение 96 *ч* в условиях относительной влажности 98% и t=40° С с предварительной выдержкой в течение 2 *ч* в нормальных условиях.

к первоначальным. Такие конденсаторы можно использовать в герметизированной аппаратуре.

При исследовании стабильности параметров конденсаторов не учитывались отказавшие в процессе испытания конденсаторы. Отказом считалась потеря работоспособности конденсатора как результат пробоя или изменение его параметров в недопустимых пределах. Надежность конденсаторов оценивалась в основном по результатам их испытаний номинальным напряжением в течение 1 000 *ч* при максимальных температурах и

Таблица 15

Характер нагрузки	Допустимые механические нагрузки на конденсаторы типа КЛГ	
	С глухими прорезями	Со сквозными прорезями
Вибрационная	От 10 до 2 500 *гц* при ускорении до 30 *g*	От 10 до 1 000 *гц* при ускорении до 10 *g*
Ударная	С ускорением до 75 *g*	С ускорением до 75 *g*
Центробежная	С ускорением до 150 *g*	С ускорением до 150 *g*

Таблица 16

Конструктивное исполнение	Предельные значения температур конденсаторов типа КЛГ групп ТКЕ, °С					
	М17	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Глухие прорези	От —60 до +155	От —60 до +125	От —60 до +125	От —60 до +125	От —60 до +100	От —60 до +80
Сквозные прорези остеклованные	То же	То же	То же	То же	То же	То же
Сквозные прорези с органическим изоляционным покрытием	От —60 до +100	От —60 до +100	От —60 до +100	От —60 до +100	От —60 до +100	От —60 до +80

в условиях повышенной влажности. Характеристикой надежности в первом случае была интенсивность отказов [Л. 22], а во втором — количество отказавших конденсаторов в процентах к испытанному (рис. 28 и табл. 17).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что конденсаторы типа КЛГ со сквозными прорезями по надежности ($\lambda_i = 4 \cdot 10^{-5}$ 1/*ч*) и влагостойкости (рис. 28 и табл. 17) находятся на уровне конденсаторов малой реактивной мощности, выпускаемых промышленностью. Однако этот уровень надежности уже не удовлетворяет современным требованиям. Повышение надежности конденсаторов принципиально может осуществляться как за счет изменения предельных условий эксплуатации, уменьшения номинального напряжения, верхнего предела температуры и влажности, так и за счет улучшения качества конденсаторов путем усовершенствования их конструкции, технологии изготовления и методов испытания.

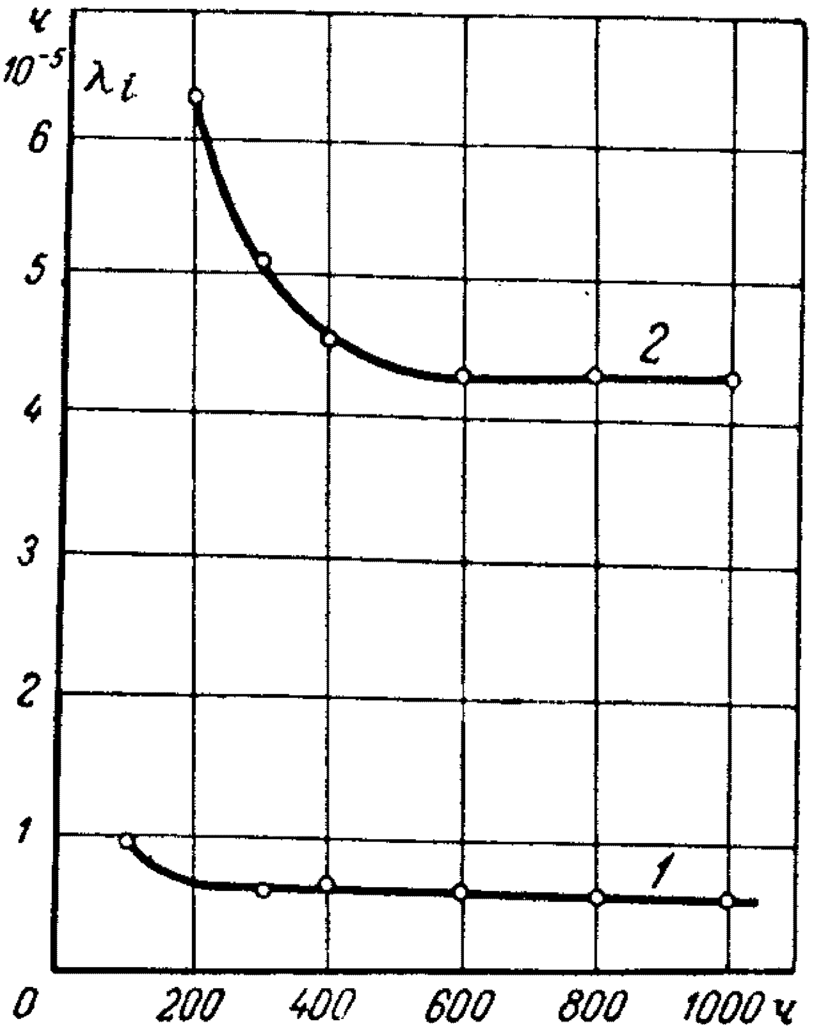


Рис. 28. Интенсивность отказов конденсаторов типа КЛГ при испытании их рабочим напряжением при максимально допустимых для каждой из групп температурах.

1 — с глухими прорезями; *2* — со сквозными прорезями.

Рассмотрим кривую интенсивности отказов (рис. 29), часто встречающуюся на практике [Л. 18] и характерную для таких элементов, как конденсаторы. Из рис. 29 видно, что кривая интенсивности отказов состоит из трех участков: участка *I* быстрого уменьшения интенсивности отказов ($0-t_0$), участка *II*, на котором интенсивность отказов либо незначительно убывает, либо практически постоянна ($t_0-t_к$), и, наконец, участка *III* резкого увеличения интенсивности отказов. Попробуем дать оценку каждому из названных участков с точки зрения надежности конденсаторов.

Первый участок, который носит название участка «приработки», характерен тем, что за время до t_0 отказывают конденсаторы, значительно отличающиеся от

Таблица 17

Конструктивное исполнение	Влагостойкость		
	Продолжительность испытания, *ч*	Испытательное напряжение, *в*	Число отказов, %
Глухие прорези	96	0	0,02
	500	0	0,25
	96	$0,5U_н$	0,35
	346	$0,5U_н$	1,5
	346	$0,5U_н$	2,8
Сквозные прорези (остеклованные)	96	0	2,38
	96	$0,5U_н$	13,5

партии испытанных конденсаторов, имеющие грубые дефекты. Третий участок — это участок появления интенсивного износа — старения конденсаторов, вызванного старением диэлектрика, материала изоляционного покрытия и материала электродов. Очевидно, что время до момента начала старения в значительной степени определяется величиной рабочих градиентов, температурой и рядом других эксплуатационных условий. Если эксплуатационные нагрузки завышены, первый и второй участки кривой интенсивности отказов могут либо вовсе отсутствовать, либо второй участок будет значительно короче. В идеальном случае, при отсутствии грубых дефектов конденсаторов и при правильно выбранных эксплуатационных нагрузках, первого и третьего участков

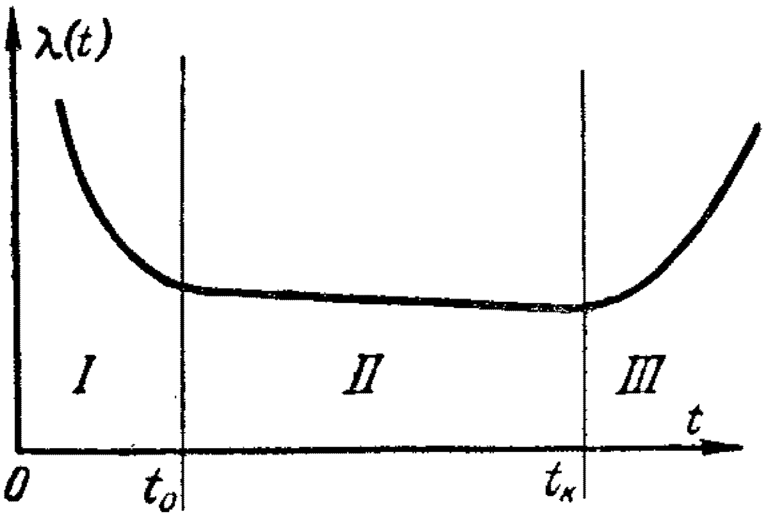


Рис. 29. Интенсивность отказов элементов при наличии периодов приработки (от $t=0$ до $t=t_0$) и износа (после $t=t_к$).

кривой интенсивности отказов в заданном отрезке времени не будет.

Остановимся несколько подробнее на втором участке и попробуем сформулировать, чем определяется на этом участке интенсивность отказов при фиксированных условиях эксплуатации. Если исходить из предположения, что отсутствие интенсивного износа свидетельствует о правильном выборе эксплуатационных нагрузок для всей партии конденсаторов, то отказы отдельных конденсаторов следует отнести за счет того, что эти конденсаторы в большей или меньшей степени отличаются от партии испытанных конденсаторов. Что может отличать отдельные отказавшие конденсаторы от всей партии конденсаторов, работающих безотказно? Очевидно, дефекты, в результате которых они оказываются нагруженными больше, чем конденсаторы, не имеющие этих дефектов. Естественно, что снижение нагрузок до уровня, при котором не отказывают даже дефектные конденсаторы, а вся партия конденсаторов работает недогруженно, повысит надежность всей партии. Но такой путь неправилен, особенно в том случае, как это видно из результатов испытания конденсаторов со сквозными прорезями (рис. 29), когда кривая интенсивности отказов состоит из двух участков — первого и второго. Характер кривой и значение интенсивности отказов ($\lambda = 4 \cdot 10^{-5}$ $1/ч$) свидетельствуют об отсутствии интенсивного износа этих конденсаторов за промежуток времени, равный 1 000 *ч*.

На основании изложенного повышение надежности конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями осуществлялось путем устранения дефектных, отличных от партии конденсаторов за счет усовершенствования конструкции технологии и методов испытания.

Работе по повышению надежности конденсаторов типа КЛГ предшествовал анализ причин, вызывавших отказы этих конденсаторов при повышенной температуре и влажности. Были установлены следующие дефекты, приводящие к отказу:

1. Неоднородность диэлектрика, вызванная его загрязнением.

2. Открытые раковины, уменьшающие толщину диэлектрика и искажающие форму электродов.

3. Раковины в теле диэлектрика и закрытая пористость, уменьшающие толщину диэлектрика.

4. Трещины в диэлектрике, искажающие поле у края трещины.

5. Трещины и раковины на границе раздела диэлектрик — изоляционное покрытие.

6. Не покрытые металлом участки на площади электродов.

Суммируя изложенное, можно заключить, что решение задачи повышения надежности конденсаторов сводилось к устранению перечисленных дефектов. Для решения этой задачи были рассмотрены: конструкция конденсаторов, технологические процессы, с которыми связано появление дефектов, а также методы испытания, при помощи которых эти дефекты могли быть выявлены.

Основные дефекты конденсаторов со сквозными прорезями — это дефекты на границе раздела изоляционное покрытие — керамический диэлектрик. Пленка органического изоляционного покрытия не защищает в достаточной степени разрядный промежуток этих конденсаторов от увлажнения. Наличие пор и микротрещин приводит также к уменьшению их электрической прочности. Появление дефектов на границе раздела стекло — керамический диэлектрик у конденсаторов с неорганическим изоляционным покрытием вызывалось недостаточным соответствием коэффициента термического расширения (КТР) стекла и керамики, недостаточной адгезией стекла по отношению к керамике и сложностью технологического процесса. Несоответствие КТР стекла и керамики приводило либо к образованию микротрещин, либо к образованию внутренних напряжений, которые со временем вызывали образование микротрещин. Наличие микротрещин увеличивало краевой эффект и уменьшало электрическую прочность конденсатора, кроме того, влага, попадая через микротрещины на разрядный промежуток, ухудшала параметры конденсаторов.

Из сказанного следует, что задача повышения надежности КЛГ должна была решаться в первую очередь за счет устранения дефектов на границе раздела изоляционное покрытие—керамический диэлектрик или путем замены этой конструкции такой, в которой эта граница

отсутствовала бы. Последнему требованию отвечала конструкция конденсаторов типа КЛГ с глухими прорезями. Для получения качественных конденсаторов выбранной конструкции надо было уделить внимание тем технологическим процессам, с которыми связано появление дефектных «ненадежных» конденсаторов, и методам испытания, позволяющим выявить эти дефекты.

Технология изготовления и методы испытания КЛГ, изложенные ниже, позволили значительно повысить надежность ($\lambda=0{,}5\cdot10^{-5}$ 1/*ч*) и влагостойкость этих конденсаторов.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ТИПА КЛГ

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА

Как уже отмечалось, качество конденсаторов определяется их конструкцией и технологией изготовления. Электрические, физико-химические и механические параметры конденсаторов (емкость, ТКЕ, добротность, электрическая и механическая прочность, влагостойкость и температуростойкость) определяются главным образом свойствами материалов, использованных в их конструкции. Вместе с тем емкость, удельная емкость, электрическая и механическая прочность характеризуются также геометрической формой и размерами конденсатора. Надо, однако, отметить, что параметры реальных конденсаторов, как правило, хуже соответствующих параметров материалов. Например, электрическая прочность конденсаторов обычно ниже электрической прочности их диэлектрика (см. стр. 22). Кроме того, при испытании однотипных по конструкции конденсаторов наблюдаются значительные отклонения параметров (электрической прочности, добротности, температуростойкости и влагостойкости) от номинального значения. Эти отклонения характеризуются технологией изготовления.

Ухудшение параметров конденсаторов, вызванное технологией изготовления, приводит к неизбежному снижению их эксплуатационных характеристик. Основные причины, снижающие качество конденсаторов, следующие: неоднородность свойств керамического диэлектрика (пористость, инородные включения и т. п.),

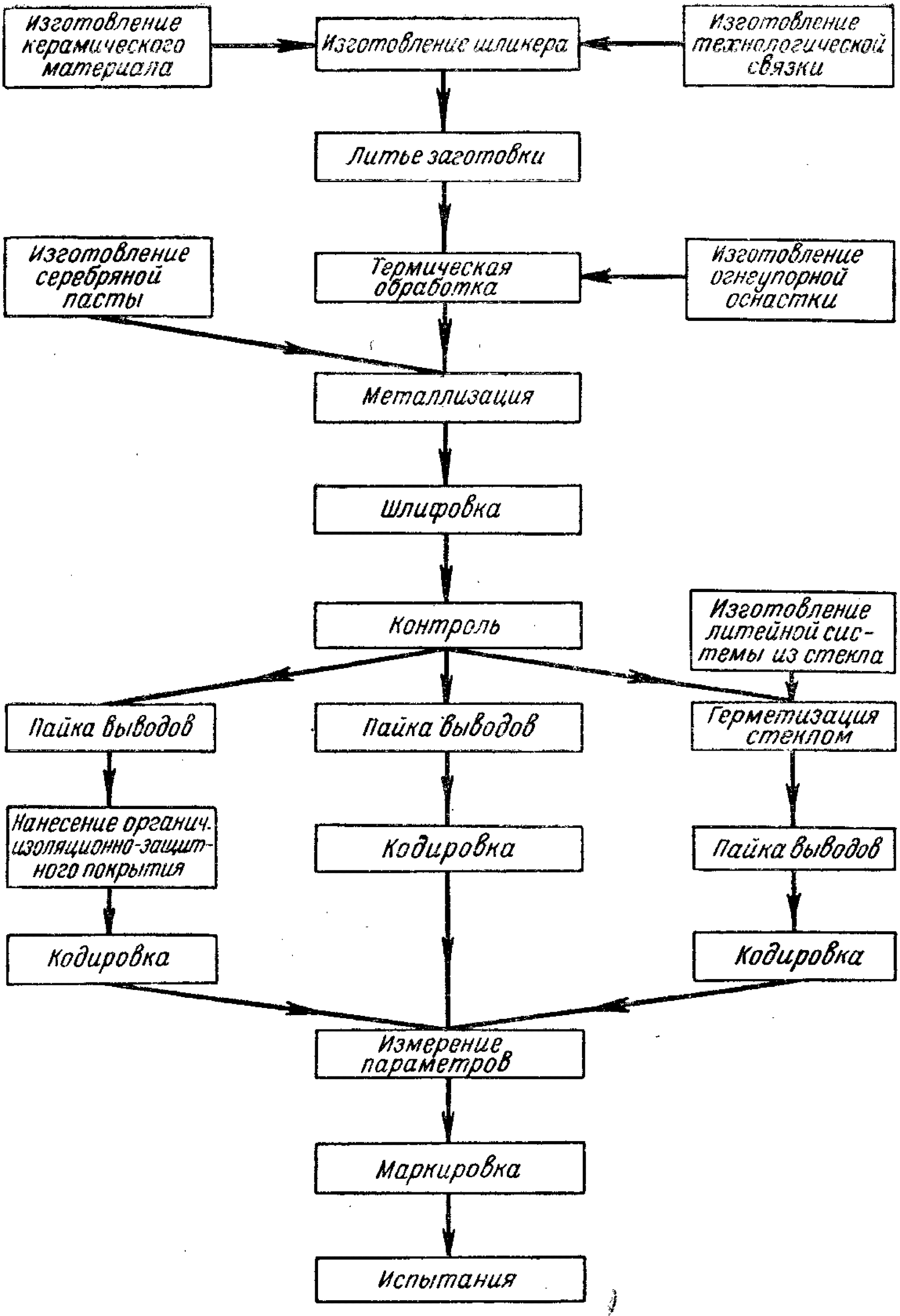


Рис. 30. Технологическая схема изготовления КЛГ.

отклонения от геометрической формы и размеров, наличие газовых включений и пустот в теле диэлектрика; наличие макро- и микротрещин; дефекты (газовые

включения, трещины и т. п.) на границах разделов различных материалов (диэлектрик — изоляционно-защитное покрытие, диэлектрик — электрод, электрод—припой и т. п.). Появление перечисленных дефектов зависит от комплекса технологических приемов и операций на различных стадиях технологии изготовления конденсаторов. Поэтому разработке технологии изготовления конденсаторов, обеспечивающей получение конденсаторов без дефектов, т. е. конденсаторов повышенной надежности, было уделено основное внимание. Технологическая схема изготовления конденсаторов типа КЛГ, основанная на технологии горячего литья [Л. 10], приведена на рис. 30.

7. ШЛИКЕРЫ

Из технологической схемы (рис. 30) видно, что оформление заготовок КЛГ (литье) производится из шликера, который образуется в результате смешивания порошка заранее синтезированного материала с расплавленной технологической связкой [Л. 10]. *Выбор керамического материала определяется требованиями, предъявляемыми к конденсаторам.* В качестве технологических связок используются органические термопластичные вещества (например, парафин) с добавкой поверхностно-активных веществ (например, воск, стеарин, жирные кислоты). Шликер в зависимости от состава и концентрации технологической связки, дисперсности и состава порошка твердого материала, способа приготовления и ряда других факторов приобретает определенные технологические свойства. Основными параметрами, характеризующими технологические свойства шликера, являются: температура плавления, вязкость, скорость отвердевания, литейная способность, усадка при охлаждении, коэффициент упаковки, устойчивость против расслаивания, механическая прочность в твердом состоянии и предельное напряжение сдвига при температурах выше температуры плавления [Л. 10].

В зависимости от конструкции *изготовляемого изделия* шликер должен обладать на различных этапах технологического процесса определенной совокупностью технологических свойств. Для изготовления заготовок конденсаторов типа КЛГ, отличающихся сложностью

конфигурации (малой толщиной и большой поверхностью стенок отливки, в которых недопустимо наличие даже мелких дефектов), шликеры должны обладать:

1) высокой литейной способностью при определенном сочетании значений вязкости и скорости отвердевания. Оптимальными являются высоковязкие шликеры, имеющие малую скорость отвердевания;

2) минимальной объемной усадкой при охлаждении;

3) высоким значением коэффициента упаковки;

4) высокой механической прочностью в твердом состоянии;

5) низким значением коэффициента трения в паре: шликер (в твердом состоянии) — сталь;

6) большим предельным напряжением сдвига (σ_{0s}) при повышенной температуре после структурирования охлаждением.

Получение шликеров с перечисленной совокупностью свойств достигается путем соответствующего варьирования состава и концентрации технологической связки в шликере, дисперсности порошка, режимов и способов изготовления шликера применительно к данному керамическому материалу.

Отобранные керамические материалы для изготовления конденсаторов, составы и свойства которых приведены в табл. 1, в соответствии с технологией горячего литья подвергались синтезу путем обжига при температурах, обеспечивающих полное завершение реакций образования материала (т. е. до полного спекания). Технологическая схема приготовления порошков конденсаторных материалов следующая: помол шихты, изготовление гранул, синтез материала обжигом, сухой помол гранул с добавкой поверхностно-активного вещества (ПАВ), просеивание. Помол шихты осуществляется в ротационных или вибрационных мельницах. Изготовление гранул производится продавливанием увлажненной шихты (обычно с добавкой 5—6% по весу минерального масла) через перфорированную решетку на гидравлических прессах. Гранулы могут быть изготовлены в виде трубочек диаметром 3—5 *мм* с толщиной стенок 0,3 *мм* или стержней (цилиндрической формы) диаметром 1—1,5 *мм*.

Синтез материала обжигом при соответствующих температурах (табл. 18) производится в электропечах

непрерывного или периодического действия с соответствующей огнеупорной оснасткой, химически инертной при высоких температурах к обжигаемому материалу. Сухой помол гранул с добавками поверхностно-активных веществ может производиться в ротационных или вибрационных мельницах. Более эффективен вибропомол. Однако для оценки возможности его применения в случае помола достаточно твердого и механически прочного синтезированного материала оказалось необходимым исследовать влияние режима помола на концентрацию примесей железа и диэлектрические свойства материалов.

Таблица 18

Материал	Температура синтеза, °С	Материал огнеупорной оснастки
ТК-20 Т-80 Т-150 Т-900 СМ-1	1 320 1 340 1 380 1 300 1 380	Шамотные короба, промазанные составом: обожженная двуокись циркония 80%, синтезированный материал Т-150—20%

В табл. 19 приведены значения диэлектрических потерь материала. Из этой таблицы видно, что истирание стальных шаров при вибропомоле приводит к появлению примесей железа в составе материала и соответственно к увеличению диэлектрических потерь этого материала. Особенно заметно увеличение примеси железа при помоле с добавкой поверхностно-активного вещества (ПАВ), но с этим иногда приходится мириться, так как ПАВ значительно ускоряет процесс помола, что особенно важно для получения больших удельных суммарных поверхностей порошка $S=5\,000$—$6\,000$ *см²/г*.

Следует отметить, что дисперсность порошков с различными удельными весами должна оцениваться по удельной суммарной поверхности порошка, выраженной в $см^2/см^3$ (S_0) [Л. 12]. Подсчет последней производится по удельной суммарной поверхности (S) и по удельному весу материала $d_м$ согласно формуле

$$S_0 = S d_м, \qquad (17)$$

где S — удельная суммарная поверхность порошка, $см^2/г$;

$d_м$ — удельный вес материала.

Таблица 1

Способ помола	Длительность помола, ч	Концентрация примесей железа, % по весу	Тангенс угла диэлектрических потерь $\times 10^4 \operatorname{tg} \delta$ при 20° С	Удельная суммарная поверхность порошка, $см^2/г$
Сухой помол без ПАВ в вибромельнице при отношении Ш:М=13:1	1 2 3 4	0,26 0,33 0,34 0,35	3,4 3,6 4,0 5,0	2 048 2 380 2 461 2 927
Сухой помол с добавкой ПАВ (0,3% пчелиного воска от веса материала) в вибромельнице при отношении Ш:М=13 :1	1 2 3 4	0,74 1,11 1,47 1,68	30 30 30 30	3 000 4 416 4 675 5 223
Сухой помол с добавкой ПАВ (0,3% пчелиного воска) от веса материала в ротационной мельнице при отношении Ш:М=2:1	45	0	6,8	5 900

Условные обозначения: Ш—вес мелющих шаров; М—вес измельчаемого материала.

Исследование влияния дисперсности порошка на свойства шликеров показало, что увеличение дисперсности порошка от значения удельной суммарной поверхности S_0=11 000—22 000 $см^2/см^3$ не приводит к существенному изменению литейной способности, вязкости и объемной усадки при охлаждении. Дальнейшее повышение S_0 от 22 000 до 33 000 $см^2/см^3$ приводит к некоторому уменьшению литейной способности и резкому увеличению вязкости шликеров. Величина объемной усадки при охлаждении изменяется незначительно (рис. 31). Учитывая, что повышение дисперсности, как показал опыт, приводит также к повышению устойчивости шликера и увеличению электрической прочности готового изделия, для всех конденсаторных материалов была выбрана одинаковая дисперсность, S_0=27 000±500 $см^2/см^3$.

В табл. 20 приведены значения удельных весов и удельных суммарных поверхностей порошков материа-

лов, применяемых при изготовлении конденсаторов типа КЛГ. При помоле в ротационной мельнице используются ультрафарфоровые или уралитовые, а при вибропомоле — металлические шары.

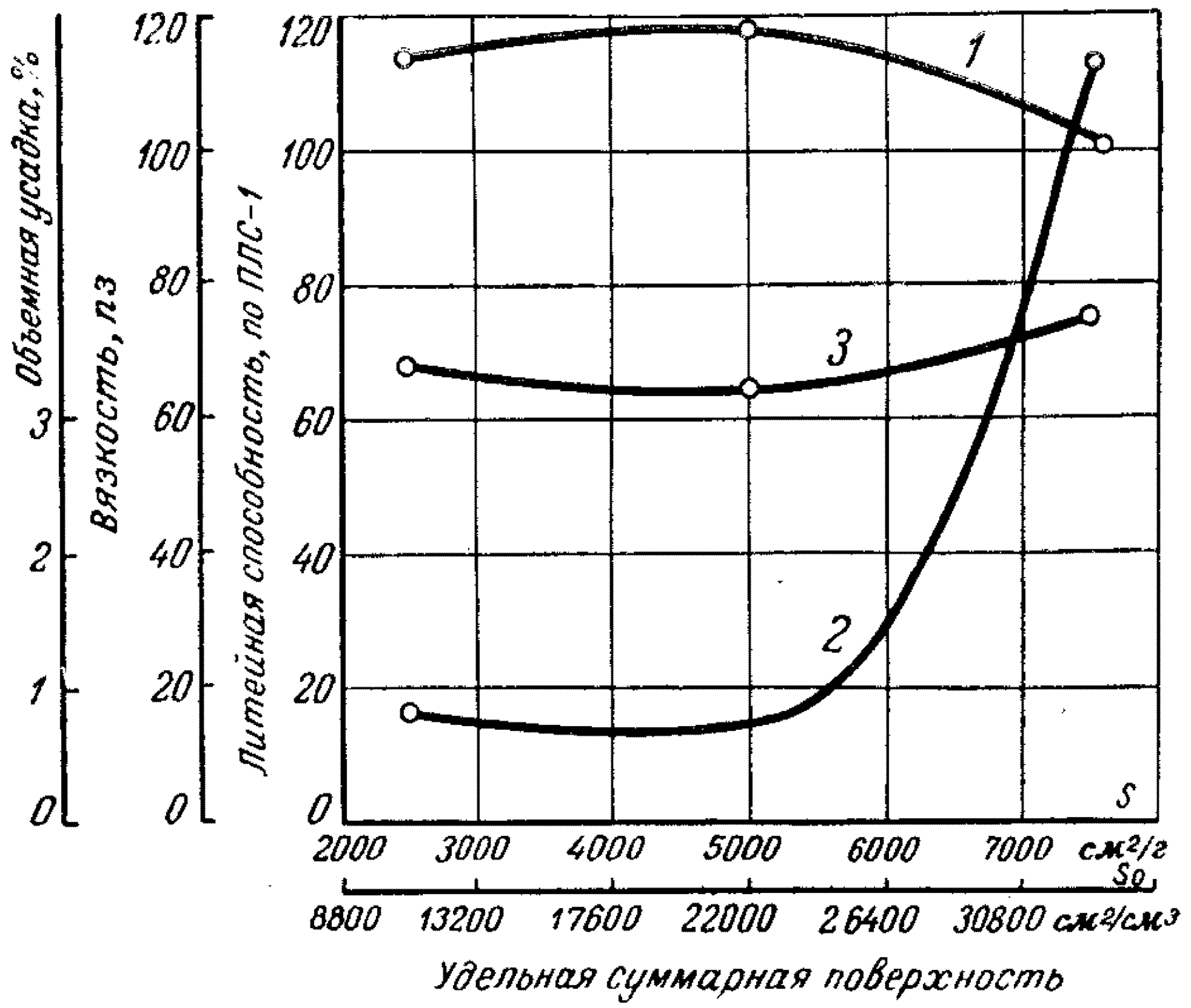


Рис. 31. Зависимость параметров шликера от удельной суммарной поверхности порошка материала ТК-20.

1 — литейная способность; *2* — вязкость; *3* — объемная усадка.

Для получения шликера измельченный до заданной дисперсности порошок материала смешивается с рас-

Таблица 20

Материал	Удельный вес, *г/см³*	S_0, *см²/см³*	*S*, *см²/г* (по прибору Товарова)	Способ помола
ТК-20	4,4	27 000	6 200	Сухой помол с добавкой ПАВ (0,3% пчелиного воска от веса материала) в ротационной мельнице
Т-80	4,0	27 000	6 700	
Т-150	4,0	27 000	6 700	
Т-900	5,3	27 000	5 100	Сухой помол с добавкой ПАВ (0,3% пчелиного воска от веса материала) в вибрационной мельнице
СМ-1	5,3	27 000	5 100	

плавленной технологической связкой. В зависимости от режима и интенсивности смешивания существенно изменяются и свойства шликера. Критерием эффективности смешивания могут служить величины литейной способности и вязкости шликера.

Для приготовления шликеров из конденсаторных материалов была разработана специальная пропеллерная мешалка (рис. 32), обеспечивающая повышенную интенсивность смешивания. Принцип устройства этой мешалки заключается в создании замкнутого принудительного кругооборота перемешиваемой жидкости и значительного увеличения при этом числа оборотов пропеллера.

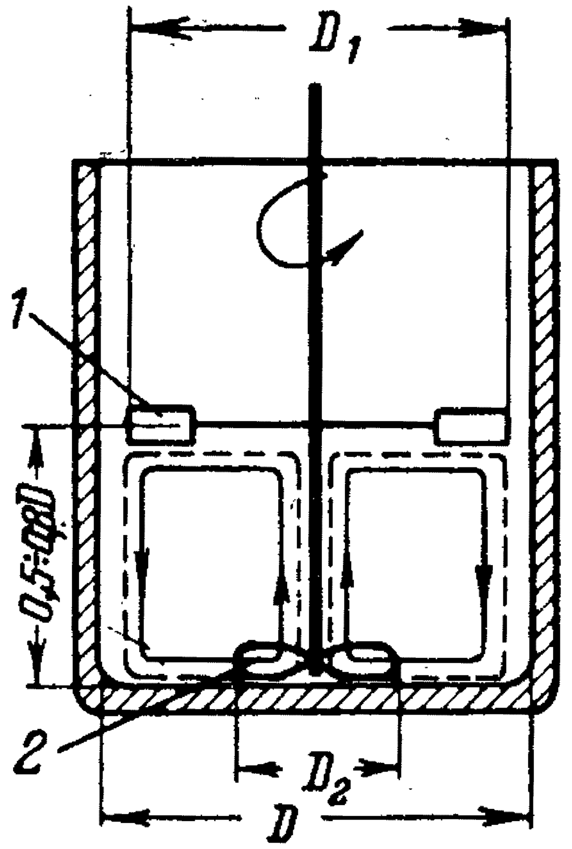


Рис. 32. Пропеллерная мешалка.

1 — диск с лопастями; 2 — пропеллер.

Мешалка состоит из диска с лопастями *1* и пропеллера *2*, насаженных на один вал на расстоянии 0,5—0,8*D*. Лопасти диска расположены на его периферии и наклонены (угол наклона лопастей 20°) так, что при вращении направляют поток жидкости на дно сосуда. Лопасти пропеллера наклонены так (угол наклона 20°), что при вращении в ту же сторону поднимают жидкость вверх. Диаметр диска с лопастями близок к диаметру сосуда $D_1=0{,}9D$, диаметр пропеллера $D_2=0{,}7D_1$. При вращении вала пропеллер поднимает жидкость вверх до вращающегося диска, затем поток жидкости направляется центробежными силами к лопастям диска. Лопасти диска направляют поток жидкости вниз к пропеллеру и т. д. При вращении вала со скоростью 900—1 400 *об/мин* обеспечивается высокая интенсивность перемешивания, эквивалентная смешиванию в МГС—мельницах горячего смешивания. Иллюстрацией высокой интенсивности смешивания в такой мешалке является наблюдаемое повышение температуры шликера до 120—140° С при отсутствии подогрева.

По сравнению с мельницами горячего смешивания (ротационными и вибрационными) мешалка такой конструкции обладает тем преимуществом, что при сме-

шивании практически не наблюдается дальнейшего измельчения частиц порошка и значительно упрощается эксплуатация, особенно при изготовлении высоковязких шликеров (отпадает трудоемкая операция очистки мелющих тел от шликера) и небольших порций (0,5—10 *кг*). При смешивании температура шликера должна быть 90—100° С. Из рис. 33 видно, что по истечении определенного времени смешивания литейная способность, достигнув максимального значения, стабилизируется. Это время принимается за оптимум при выборе режима приготовления шликера.

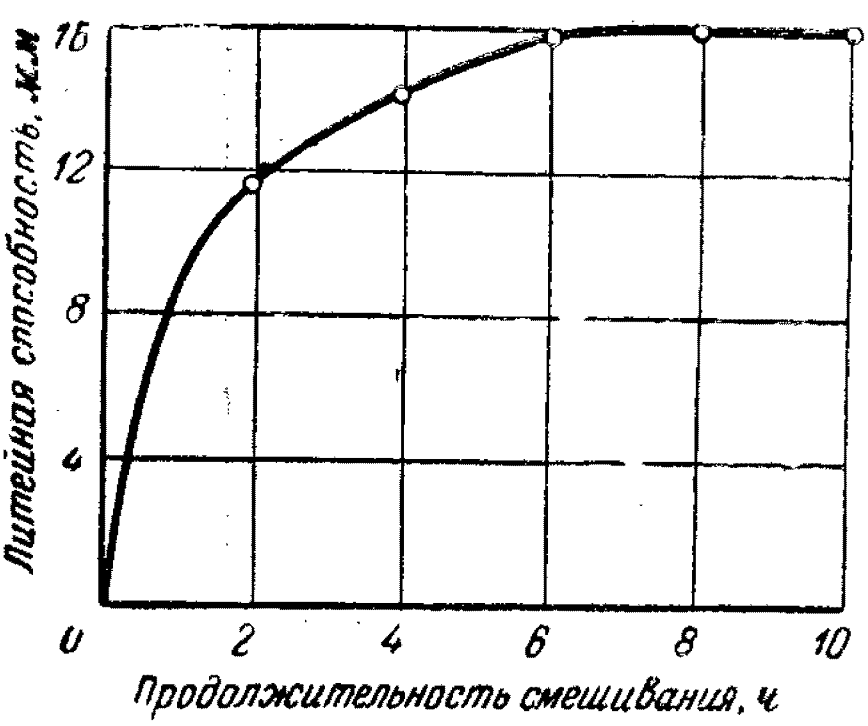


Рис. 33. Зависимость литейной способности шликера (по ПЛС-2) от продолжительности смешивания в пропеллерной мешалке.

Свойства шликеров зависят от целого ряда факторов и в первую очередь от состава порошка и технологической связки и концентрации связки в шликере. Литейная способность, т. е. способность шликера заполнять металлическую формулу, воспроизводя ее конфигурацию, является одним из основных технологических параметров.

На рис. 34 приведены приборы для определения литейной способности шликера. Прибор ПЛС-2 предназначен для определения литейной способности шликеров, используемых для литья тонкостенных изделий. Для определения литейной способности прибор ПЛС устанавливается под пневматический прижим литейной машины (рис. 35) так, чтобы его входное отверстие совпало с питающей трубкой *3*. Расплавленный шликер через питающую трубку *3* под давлением поступает в канал прибора, заполняя его, охлаждается и отвердевает. Высота отливки характеризует литейную способность шликера и зависит от вязкости и скорости отвердевания шликера, а также от условий литья, температуры шликера и прибора, сечения питающей трубки, скорости нарастания давления в рабочем баке литейной машины и

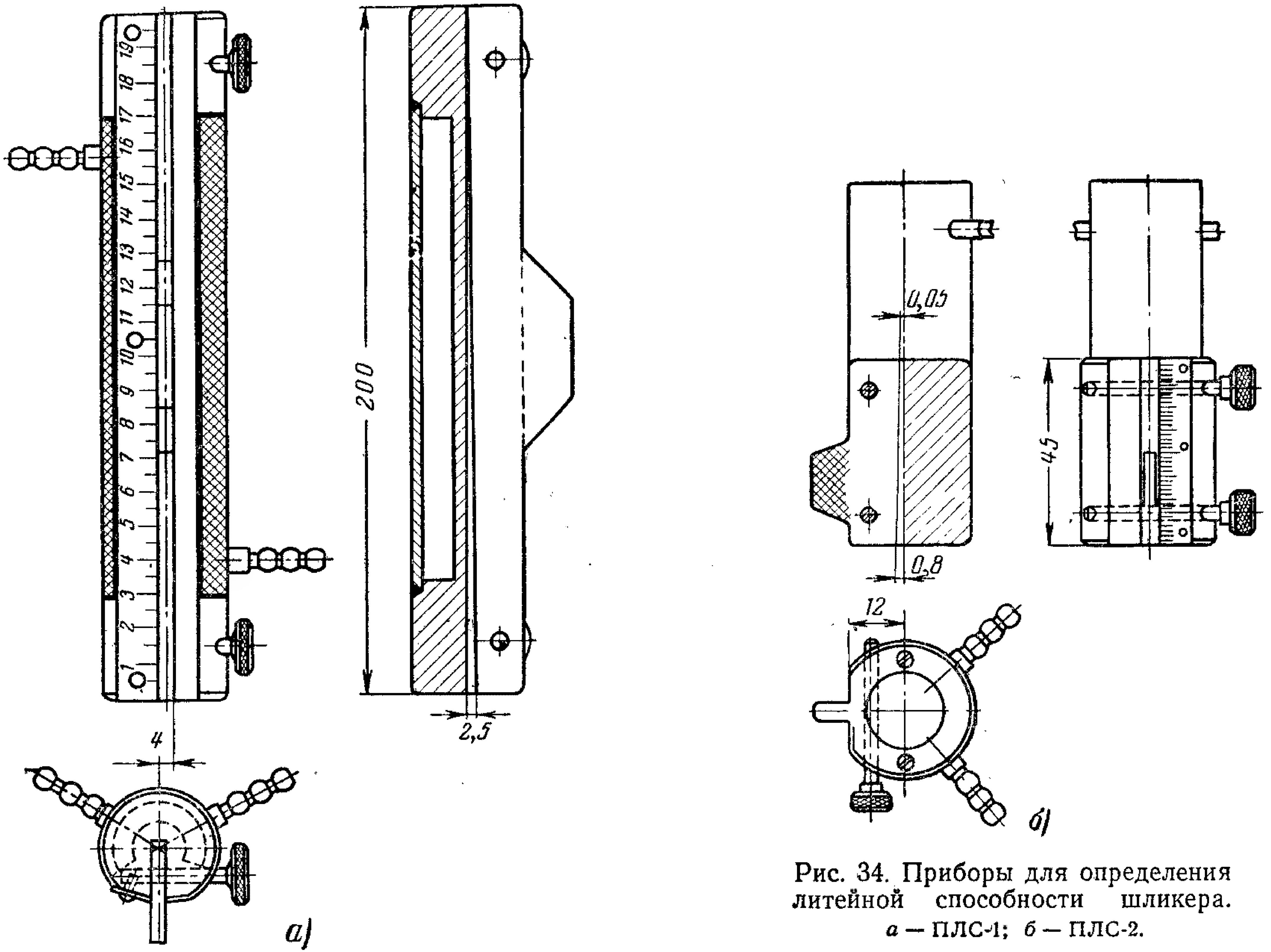


Рис. 34. Приборы для определения литейной способности шликера.
а — ПЛС-1; *б* — ПЛС-2.

Таблица 21

Литейная способность шликеров из порошков различных конденсаторных материалов удельной суммарной поверхности 27 000 $см^2/см^3$

Наименование материала	К-во связки, %	Состав связки	Ширина канала приспособления, *мм*	Литейная способность шликеров при температуре формы $t_ф = 40°$ С, давлении воздуха на шликер $P=3$ *ат*, температуре шликера $t_ш$, °С			Литейная способность шликеров при температуре шликера $t_ш = 90°$ С, давлении воздуха на шликер $P=3$ *ат*, температуре формы $t_ф$, °С			Литейная способность шликеров при температуре шликера $t_ш = 90°$ С, температуре формы $t_ф=40°$ С, давлении воздуха на шликер *P*, *ат*	
				70	80	100	20	30	40	1,5	4,5
ТК-20	6	10% — воск 90% — парафин	0,5	2,4	2,7	3,1	2,5	2,7	2,9	2,4	3,1
			0,6	2,8	3,3	3,8	3,2	3,3	3,4	3	4,1
			0,7	4,1	4,5	6,1	5	5,4	5,8	4,3	6
			0,8	4,7	5,7	7,8	5,7	5,9	6,1	5	6,4
			0,9	5,9	7,3	10,5	7,7	7,8	8	7	9,4
			1,0	6,8	8,8	11,8	8,7	9	9,2	8	11,5
			2,5	26	34	58	47	43	52	41	57
ТК-20	6	2% — стеарин 88% — парафин 10% — воск	0,5	3,8	4,4	5,4	4,1	4,5	4,7	4,4	5,8
			0,6	5	5,9	8,4	5,5	6,2	7,3	6	7,9
			0,7	7,1	8,5	10,2	8,4	9,2	10	8,8	10,6
			0,8	8,2	9,7	12,4	9,2	10	11,2	9,5	12,6
			0,9	11,6	13,3	17,2	12,3	13,8	15,2	11,9	18,5
			1,0	12,5	15	19,2	13,5	15,3	16,7	13,7	19,7
			2,5	51	61	73	57	63	65	50	74
ТК-20-80	6	10% — воск 90% — парафин	0,5	2,2	3	4,4	2,8	3	3,4	2,7	4
			0,6	2,8	4	5,9	3,8	4	4,6	3,4	5,6
			0,7	3	5,8	8,7	5,7	6	6,3	5,1	8,2
			0,8	5,1	7,3	10,2	6,1	7,1	7,6	5,8	9,3
			0,9	6,2	9,8	14,1	8,6	9,2	10,4	7,2	12,5
			1,0	8,1	11	16	10,4	10,9	11,5	9,2	14,6
			2,5	41	49	72	44	54	58	42	62

ТК-20-80	6	2% — стеарин 88% — парафин 10% — воск	0,5	3,0	3,3	4,5	2,9	3,1	3,5	2,4	3,9
			0,6	4,3	4,6	7,2	4,3	4,5	5,5	3,9	5,7
			0,7	6,5	7	10,5	6,2	6,8	7,4	6,6	8,6
			0,8	7,6	8	12	6,8	7,1	8,6	7,4	10,2
			0,9	10,2	10,8	16,7	9,2	9,7	12,2	10,2	14,7
			1,0	11,8	12,4	18,5	10,2	11,8	13,9	11,9	16
			2,5	42	59	73	54	62	64	42	68
Т-80	7	10% — воск 90% — парафин	0,5	2,8	3,6	4,8	3,3	4	4,2	3,3	4,9
			0,6	3,7	4,8	7,2	5,3	5,3	5,7	4,7	6,6
			0,7	5,2	6,8	9,7	7,6	8,2	8,7	7	9,8
			0,8	5,2	8,9	11,2	8,8	9,8	10,1	7,8	11,5
			0,9	7,9	10,2	14,9	11,9	12,5	13	10,2	15,1
			1,0	9,2	11,6	18	13,2	14,8	15,8	11,6	17,8
			2,5	38	54	73	57	62	65	52	75
Т-80	7	2% — стеарин 80% — парафин 10% — воск	0,5	2,5	4,2	6,1	4,8	5,2	5,6	4,3	6
			0,6	4,3	6,5	8	6,7	6,1	6,8	6	7
			0,7	5,7	8,7	12,1	9,2	9,6	10,4	8,8	10
			0,8	7,4	10,5	13,2	10,5	11,3	11,9	10	12,5
			0,9	10	14	18,8	14,5	15,5	16,5	13	18
			1,0	11,4	15,8	20,4	16,5	16,5	18,5	14,6	19,8
			2,5	38	65	84	64	73	78	54	84
Т-150	7,5	10% — воск 90% — парафин	0,5	2,6	3,6	5,4	4	4,4	4,6	3,8	4,7
			0,6	3,2	5,3	7,7	5,6	5,8	6,3	5	6,5
			0,7	4,6	7,6	10	8,0	8,2	8,4	6,5	8,8
			0,8	5,5	8	11,4	8,6	8,8	9,8	7,5	11,3
			0,9	7,8	11,6	15,4	11,8	12,5	13,1	10	13,5
			1,0	8,3	13,1	17,3	13,5	14,2	14,5	12,2	15,8
			2,5	38	53	79	55	59	68	54	76
Т-150	7,5	2% — стеарин 88% — парафин 10% — воск	0,5	3,9	4,9	6,6	5,2	5,7	5,9	4,9	6,2
			0,6	4,9	7,3	9,5	7,5	8	8,4	7,3	9,5
			0,7	7,2	10,4	13,4	10,4	11,7	12,1	9,3	14,2
			0,8	8,5	11,5	15,5	11,7	12,8	13,4	11,3	16
			0,9	12	15,7	19,6	16,3	17	18,3	13,7	20,2
			1,0	13,6	17,5	21,5	18,2	19,5	20,5	17,4	22
			2,5	62	79	89	73	77	86	70	92

Продолжение табл. 21

Наименование материала	К-во связки, %	Состав связки	Ширина канала приспособления, *мм*	Литейная способность шликеров при температуре формы $t_ф = 40°$ C, давлении воздуха на шликер $P=3$ *ат*, температуре шликера $t_ш$, °C			Литейная способность шликеров при температуре шликера $t_ш = 90°$ C, давлении воздуха на шликер $P=3$ *ат*, температуре формы $t_ф$, °C			Литейная способность шликеров при температуре шликера $t_ш = 90°$ C, температуре формы $t_ф=40°$ C, давлении воздуха на шликер P, *ат*	
				70	80	100	20	30	40	1,5	4,5
Т-900	5,8	10% — воск 90% — парафин	0,5	1,5	3,1	3,8	3,1	3,4	3,7	3	4,1
			0,6	2,5	4,3	5,2	4,4	4,8	5,1	3,6	6
			0,7	3,8	6,2	7,8	5,6	6,4	6,8	4,6	7,9
			0,8	4,6	7,2	8,8	6,6	7	8	7,1	8,6
			0,9	6,1	8,8	11,9	8,5	9,4	11	9,0	12,1
			1,0	6,8	10,7	13,5	10,5	11,3	12,1	10,5	14,1
			2,5	26	37	60	44	50	56	40	63
Т-900	5,8	2% — стеарин 10% — воск 88% — парафин	0,5	2,8	3,5	4	2,7	3	3,7	2,7	4,1
			0,6	4	4,5	6,2	4,0	4	4,6	3,8	5,3
			0,7	5,3	6,9	8	5,2	5,5	7,0	5,1	7,6
			0,8	6,1	7,8	9,5	6,1	5,6	7,9	6,3	9,2
			0,9	8,1	10,4	13,4	7,1	8	11,0	9,2	12,5
			1,0	9,7	12,2	15,5	9,4	10	12,5	10,1	13,5
			2,5	40	50	65	43	51	55	44	70
СМ-1	5,5	10% — воск 90% — парафин	0,5	2,8	4	6	3	3,7	4,8	3,5	5,3
			0,6	4	5,7	8,3	5,0	6	7,2	5,5	8,3
			0,7	6,8	8	9	6,2	7,3	8,4	7,3	10,6
			0,8	8	9,5	11,5	8,3	8,5	9,8	9,1	12,5
			0,9	11	12,5	14,1	10,3	11,7	13,2	12,5	16
			1,0	13	15	19	12,5	14	16,6	14	13
			2,5	51	58	71	43	49	63	40	70
СМ-1	5,5	2% — стеарин 88% — парафин 10% — воск	0,5	2,3	3,7	4,7	3,7	4,1	4,5	4	5
			0,6	3,6	6,1	8,2	6	6,4	6,7	5,3	7
			0,7	5,2	8,1	11	8	8,8	9,2	8,1	11,6
			0,8	6,1	9,3	13,2	8,8	11,2	12,2	9	13
			0,9	9,8	13,4	17,1	12	15,5	16,8	12,3	18
			1,0	11,5	15,5	20	13,6	17,9	19	13,9	20,2
			2,5	61	69	88	55	70	81	59	89

размеров проходного сечения прибора. В табл. 21 приведены экспериментальные данные, характеризующие зависимость литейной способности шликеров из порошков конденсаторных материалов от перечисленных факторов, при постоянном сечении (2,2×14 *мм*) питающей трубки литейной машины и постоянной скорости нарастания давления (литейная машина типа ЛПГ-1Л).

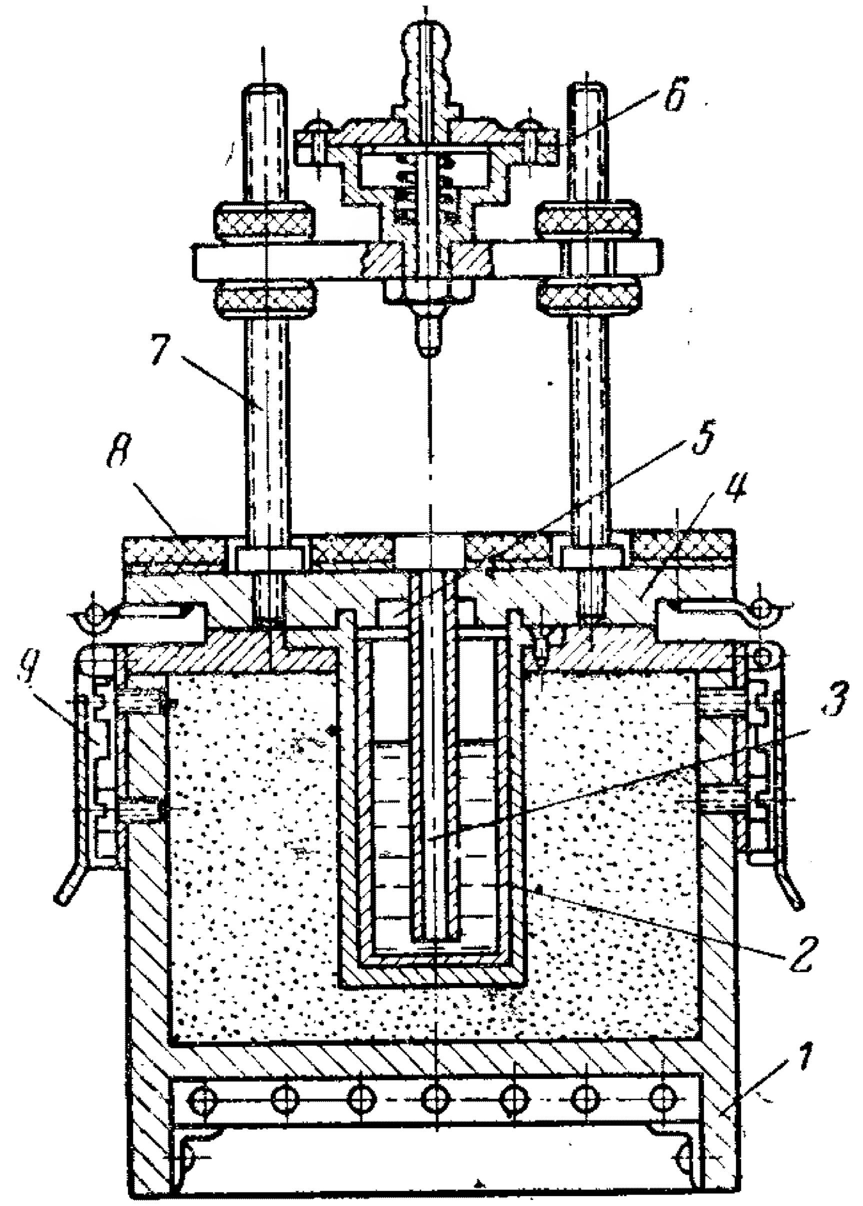


Рис. 35. Литейная машина.

1 — корпус типа ЛПР-1; *2* — бак, заполненный шликером; *3* — питающая трубка; *4* — крышка; *5* — отверстие, через которое поступает сжатый воздух; *6* — пневматический прижим; *7* — стойка; *8* — текстолитовая прокладка; *9* — зажимы.

Увеличение литейной способности может быть осуществлено за счет повышения концентрации связки в системе, изменения состава связки и интенсификации смешивания порошка с технологической связкой при изготовлении шликера. Самый, казалось бы, простой способ увеличения литейной способности, путем повышения концентрации связки в шликере, приводит к нежелательному уменьшению коэффициента упаковки и увеличению объемных усадок (рис. 36). Поэтому получение шликера с необходимым показателем литейной способности при минимальной концентрации связки должно обеспечиваться путем соответствующего выбора состава связки и режимов смешивания. Было установлено, что небольшие добавки некоторых поверхностно-активных веществ (пчелиный воск и стеарин) в шликеры из конденсаторных материалов с кристаллической основой $ZrTiO_4$, TiO_2, $CaTiO_3$, $(SrBi)TiO_3$, $(BaTiO_3)_{0,9} \times \times (BaZrO_3)_{0,075}$ заметно повышают их литейную способность. При этом если в качестве поверхностно-активного вещества использовать пчелиный воск, то образовать

шликер можно при меньшей объемной концентрации связки, чем в случае использования стеарина. Влияние состава связки на свойства литейной системы из материала ТК-20 приведено в табл. 22.

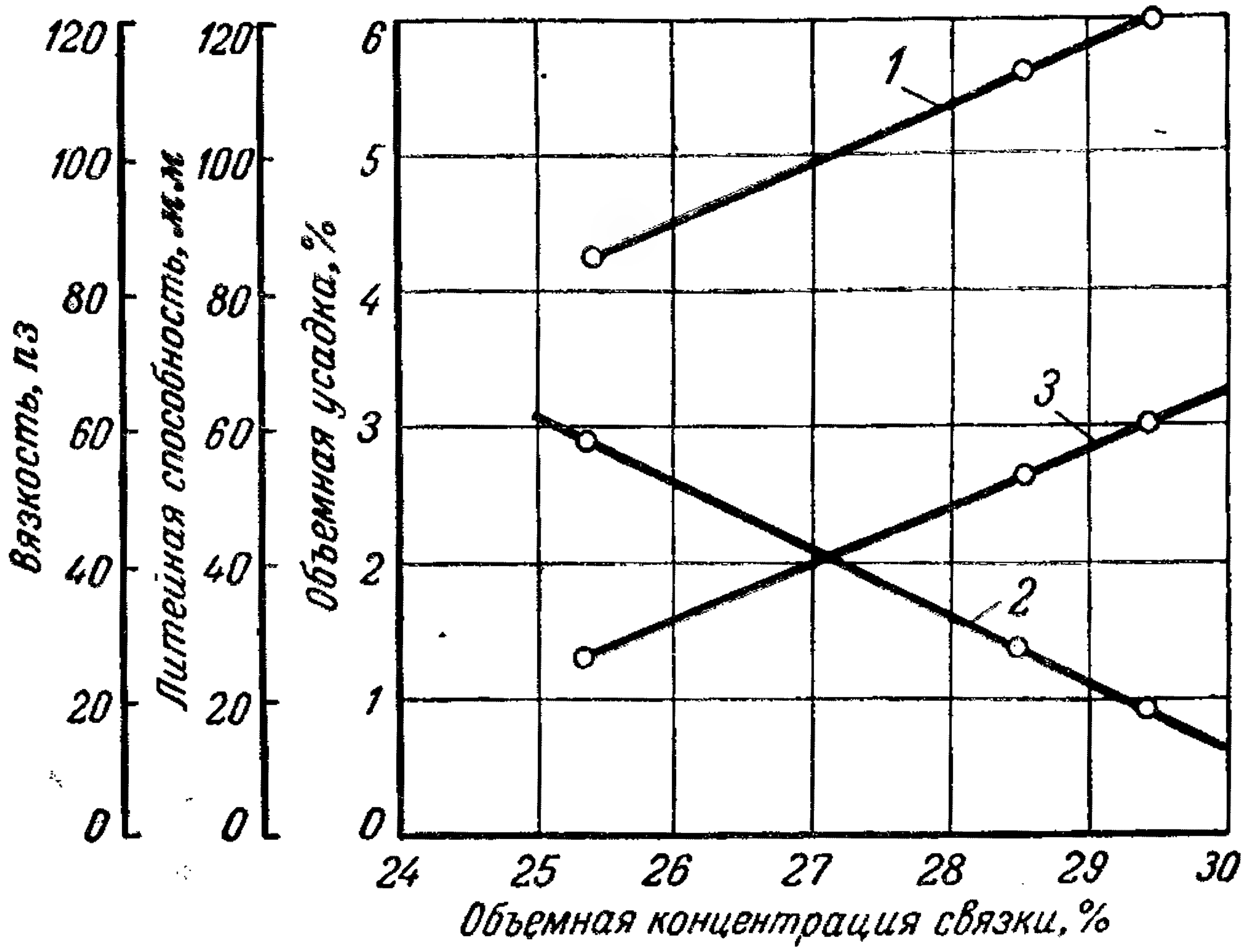


Рис. 36. Зависимость параметров шликера из порошка материала ТК-20, $S=5\,000$ *см²/г* (состав связки: 90% парафина, 10% пчелиного воска) от объемной концентрации связки в шликере.

1 — литейная способность (по ПЛС-1); *2* — вязкость; *3* — объемная усадка.

Увеличение количества воска в связке заметно повышает литейную способность шликера (рис. 37). Исследование шликеров, в состав которых в качестве поверхно-

Таблица 22

Состав связки, %				Объемная концентрация связки в шликере, %	Литейная способность по ПЛС-1
Основа	Добавки				
Парафин	Воск пчелиный	Стеарин	Олеиновая кислота		
100	—	—	—	40	36
94	6	—	—	40	135
94	—	6	—	40	120
94	—	—	6	40	40

стно активных веществ вводились комплексные добавки ПАВ (из воска и стеарина) показало, что добавка стеарина приводит к заметному уменьшению коэффициента трения в паре: шликер — сталь. Это значительно облегчает извлечение заготовки конденсаторов из формы, что

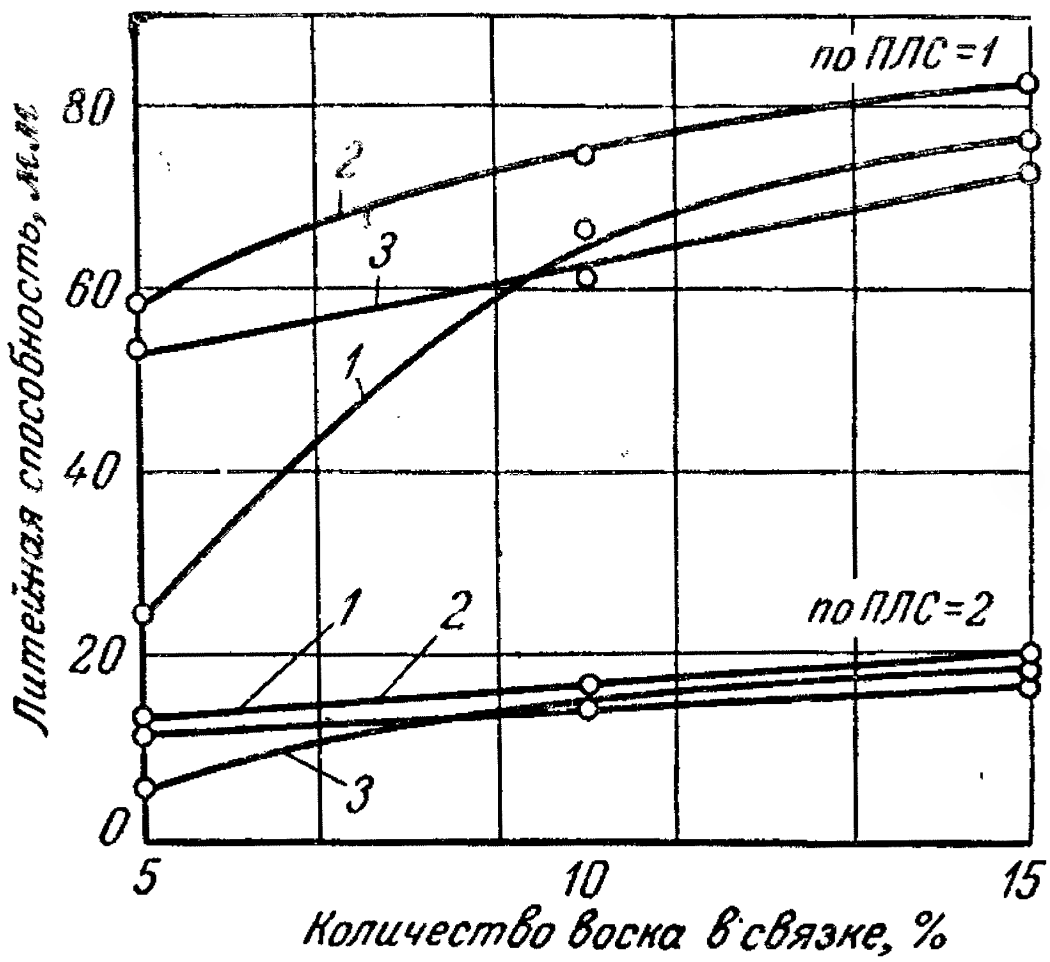


Рис. 37. Зависимость литейной способности шликеров из порошков материалов от концентрации воска в связке.
1 — СМ-1; *2* — Т-150; *3* — ТК-20.

предохраняет ее от механических дефектов. Надо также отметить, что добавка стеарина приводит к визуально наблюдаемому структурированию шликера. Некоторые результаты исследования свойств шликеров, изготовленных из порошков различных конденсаторных керамических материалов, приведены в табл. 23. Из этих данных видно, что свойства шликеров существенно зависят от состава керамического материала (порошка). Так, например, шликеры из порошков керамических материалов с кристаллической основой TiO_2 и $CaTiO_3$, несмотря на бóльшую объемную концентрацию связки, обладают той же или меньшей литейной способностью, нежели шликеры из порошков материалов с кристаллической основой $ZrTiO_4$ и $(BaTiO_3)_{0,9}\cdot(BaZrO_3)_{0,075}$.

Высокая литейная способность шликера обычно является следствием малой вязкости. Однако существуют и такие шликеры, у которых, несмотря на большую

Таблица 23

Физические свойства	Параметры шликеров из порошков материалов			
	СМ-1 $(BaTiO_3)_{0,9} \times$ $\times (BaZrO_3)_{0,075}$	ТК-20 ($ZrTiO_4$)	Т-80 (TiO_2)	Т-150 ($CaTiO_3$)
Объемная концентрация связки, %	27,7	28,5	29,4	30,3
Литейная способность по МПЛС-1, *мм*	92	112	75	97
еханическая прочность на изгиб, *кГ/см²*	137	150	149	147
Объемная усадка при охлаждении, %	2,93	2,52	2,02	3,62

вязкость, наблюдается высокая литейная способность. Это свидетельствует о малой скорости отвердевания таких шликеров. Процесс формирования отливки в метал-

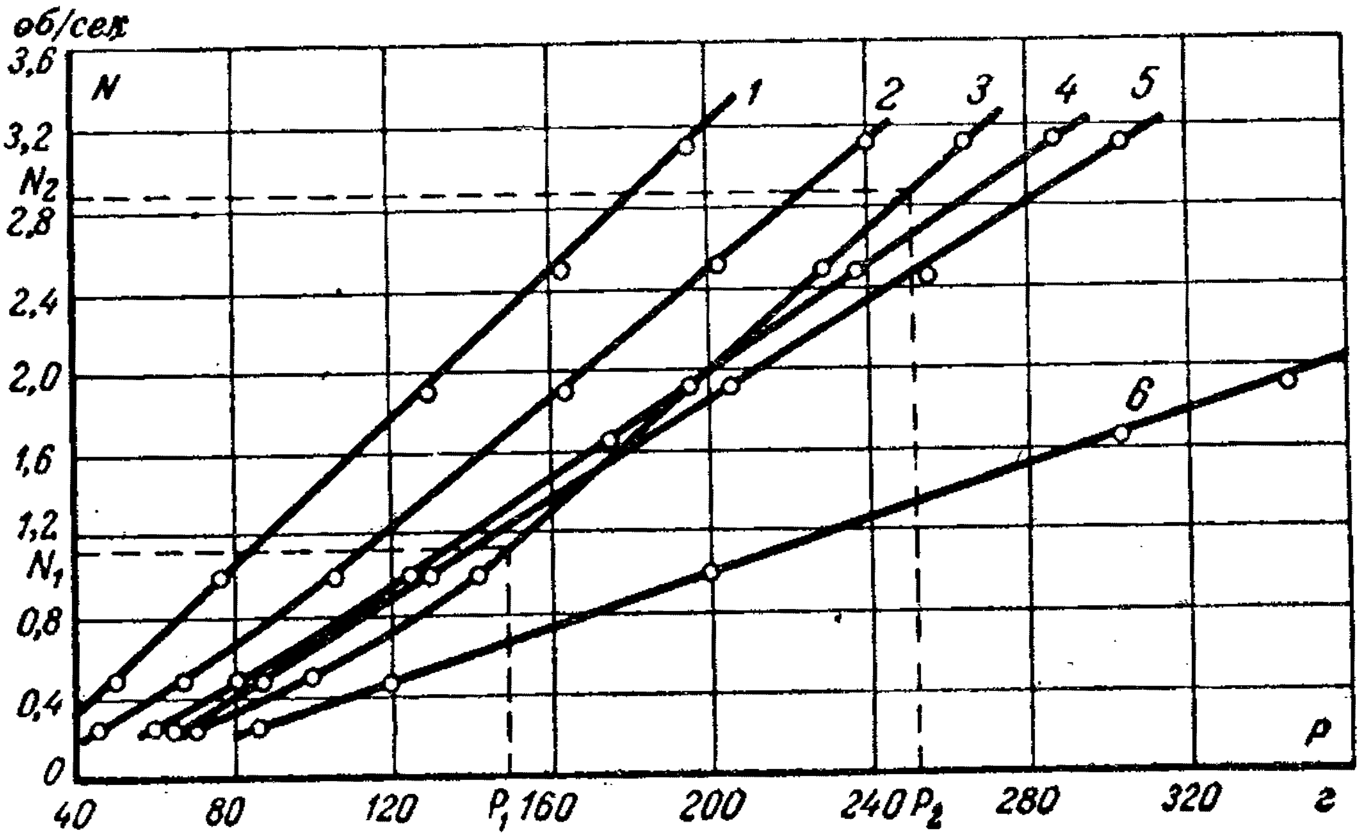


Рис. 38. Реологические кривые шликеров из порошков различных материалов. Состав связки: 90% парафина, 10% воска, объемная концентрация связки в шликере 23—26%. Температура шликера 90° С.

1 — СМ-1; *2* — Т-150; *3* — Т-900; *4* — ТК-20 и ТК-80; *5*—Т-80; *6* — ТК-20.

лической форме, представляющий собой совокупность механизмов заполнения формы и отвердевания отливки, в значительной мере определяется вязкостью и скоростью отвердевания шликера. Поэтому исследование этих параметров представляет большой интерес.

Реологические свойства шликеров исследовались

с использованием усовершенствованного вискозиметра М. Л. Воларовича [Л. 4, 5, 10]. Из реологических кривых (рис. 38) видно, что шликеры, как и большинство дисперсных систем [Л. 16], представляют собой структурированные системы, вязкость которых уменьшается с увеличением градиента скорости. Уменьшение вязкости при увеличении градиента скорости происходит до тех пор, пока вся структура не разрушена. Дальнейшее увеличение градиента скорости не вызывает снижения вязкости. Вязкость остается постоянной при увеличении градиента скорости до тех пор, пока при больших скоростях для некоторых систем не наступает турбулентный режим, и вязкость начинает увеличиваться. При исследовании шликеров использовались градиенты скорости, при которых турбулентный режим не наблюдался. Вязкость шликеров определялась на прямоугольном участке кривой $N=f(P)$ по формуле

$$\mu = K \operatorname{ctg} \alpha \qquad (18)$$

или

$$\mu = K \frac{P_2 - P_1}{N_2 - N_1}, \qquad (19)$$

где μ — вязкость;

K — постоянная прибора;

P_1, P_2 — грузы, вращающие внутренний цилиндр вискозиметра, *г*;

N_1, N_2 — скорости вращения внутреннего цилиндра вискозиметра, *об/сек*.

Постоянная ротационного вискозиметра Воларовича

$$K = \frac{Rg}{8\pi^2 \left(\frac{h r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^3 r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} \right)}, \qquad (20)$$

где R — радиус шкива, *см*;

h — высота уровня жидкости в цилиндре, *см*;

r_1 — радиус внутреннего цилиндра, *см*;

r_2 — радиус наружного цилиндра, *см*;

g — ускорение силы тяжести, *см/сек*^{2}.

Результаты определения вязкости шликеров и температурной зависимости вязкости даны в табл. 24. Определение вязкости производилось по реологическим кривым,

Состав связки	Температура, °С	ТК-20			ТК-20-80			Т-80		
		Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*	Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*	Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*
90% парафина, 10% воска	70	26	5,9	70	41	6,2	52	38	7,9	54
	80	34	7,3	66	49	9,8	46,5	54	10,2	36,5
	90	52	8,0	62	58	10,4	34,5	65	13,0	36
	100	58	10,0	—	72	14,1	—	73	14,9	—
88% парафина, 10% воска, 2% стеарина	70	51	11,6	55	42	10,2	45,6	58	10,0	24,6
	80	61	13,3	43	59	10,8	32,5	65	14,0	22
	90	65	15,2	38	64	12,2	26,8	78	16,5	18
	100	73	17,2	—	73	16,7	—	84	18,8	—

аналогичным кривым на рис. 38. В этой же таблице приведены значения показателя литейной способности шликеров.

Из полученных результатов видно, что литейная способность шликеров в большинстве случаев характеризуется их вязкостью. Малому значению вязкости соответствует большое значение показателя литейной способности. Исключение составляют шликеры из порошков материалов ТК-20 и Т-900. У первого при большой вязкости относительно большая литейная способность, а у второго при малой вязкости относительно небольшая литейная способность. Это свидетельствует о существенно разной скорости отвердевания (кристаллизации) названных шликеров, малой у шликера из ТК-20 и большой из материала Т-900. О скорости отвердевания шликера можно судить по изменению его вязкости, при охлаждении, в функции времени, а также по изменению температуры охлаждаемого шликера во времени. Оценка скорости отвердевания шликеров проводилась по второму способу. Сущность этого способа заключается в том, что расплавленное термопластичное вещество (например, шликер) охлаждается и при этом фиксируется изменение его температуры во времени. Скорость отвердевания термопластичного вещества оценивается по изменению температуры вещества в функции времени:

$$t_{\text{вещества}} = f(T_{\text{времени}}). \qquad (21)$$

Таблица 24

Т-150			Т-950			СМ-1		
Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*	Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*	Литейная способность по ПЛС-1, *мм*	Литейная способность по ПЛС-2, *мм*	Вязкость, *пз*
38	7,8	38	26	6,1	51	51	11,0	46
53	11,6	32	37	8,8	37	58	12,5	40,5
68	13,1	24	56	11,0	29,0	66	13,2	33
79	15,4	—	60	11,9	—	71	14,1	—
62	15,7	21	40	8,1	24,5	62	9,8	29
79	18,3	21	50	10,4	21	69	13,4	21,5
86	19,6	19	55	11,9	16,3	80	16,8	15,05
89	16,3	—	65	13,4	—	88	17,1	—

На рис. 39 схематически изображено приспособление для определения температуры кристаллизации и скорости отвердевания термопластичных веществ. Расплавленное термопластичное вещество заливается в металлический стакан до определенного уровня. Для фиксации положения термометра, помещенного в термопластичное вещество, он крепится в крышке стакана. Охлаждается вещество водой, циркулирующей в полости. Постоянная температура воды поддерживалась ультратермостатом ТС-15. Скорости охлаждения парафина, стеарина, воска и шликеров из порошков различных конденсаторных материалов приведены на рис. 40 и 41.

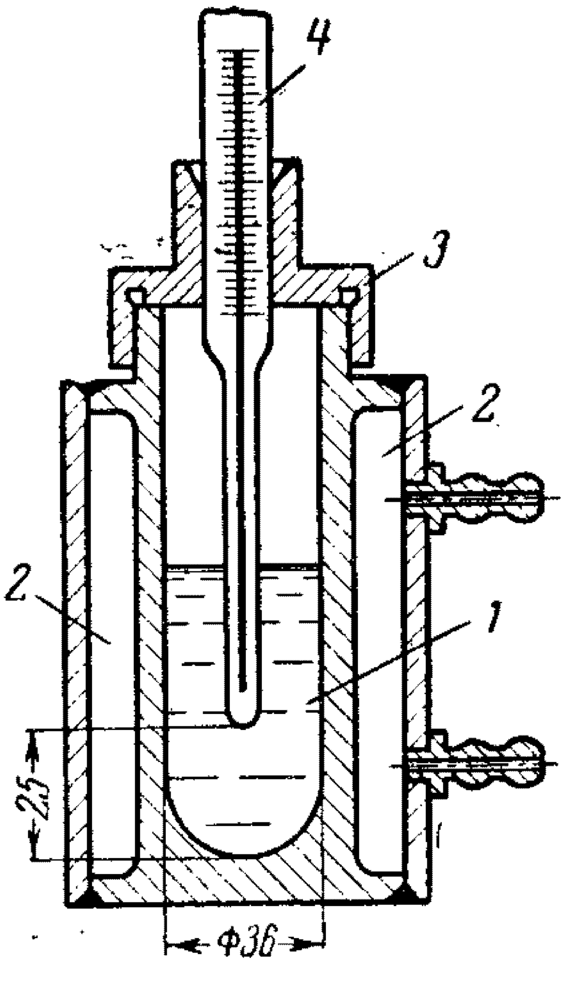


Рис. 39. Приспособление для определения температуры и скорости отвердевания термопластичных веществ.

1 — металлический стакан; *2* — полость, заполненная водой; *3* — крышка; *4* — термометр.

По кривым рис. 40 можно судить как о скорости отвердевания термопластичных веществ, так и о температуре кристаллизации (температуре плавления), которая характеризуется участ-

ком кривой с минимальной скоростью изменения температуры во времени. Практически температура некоторое время остается постоянной. Кристаллизация пчелиного воска происходит, начиная с температуры 63—61° С, парафина — с 55—54° С и стеари-

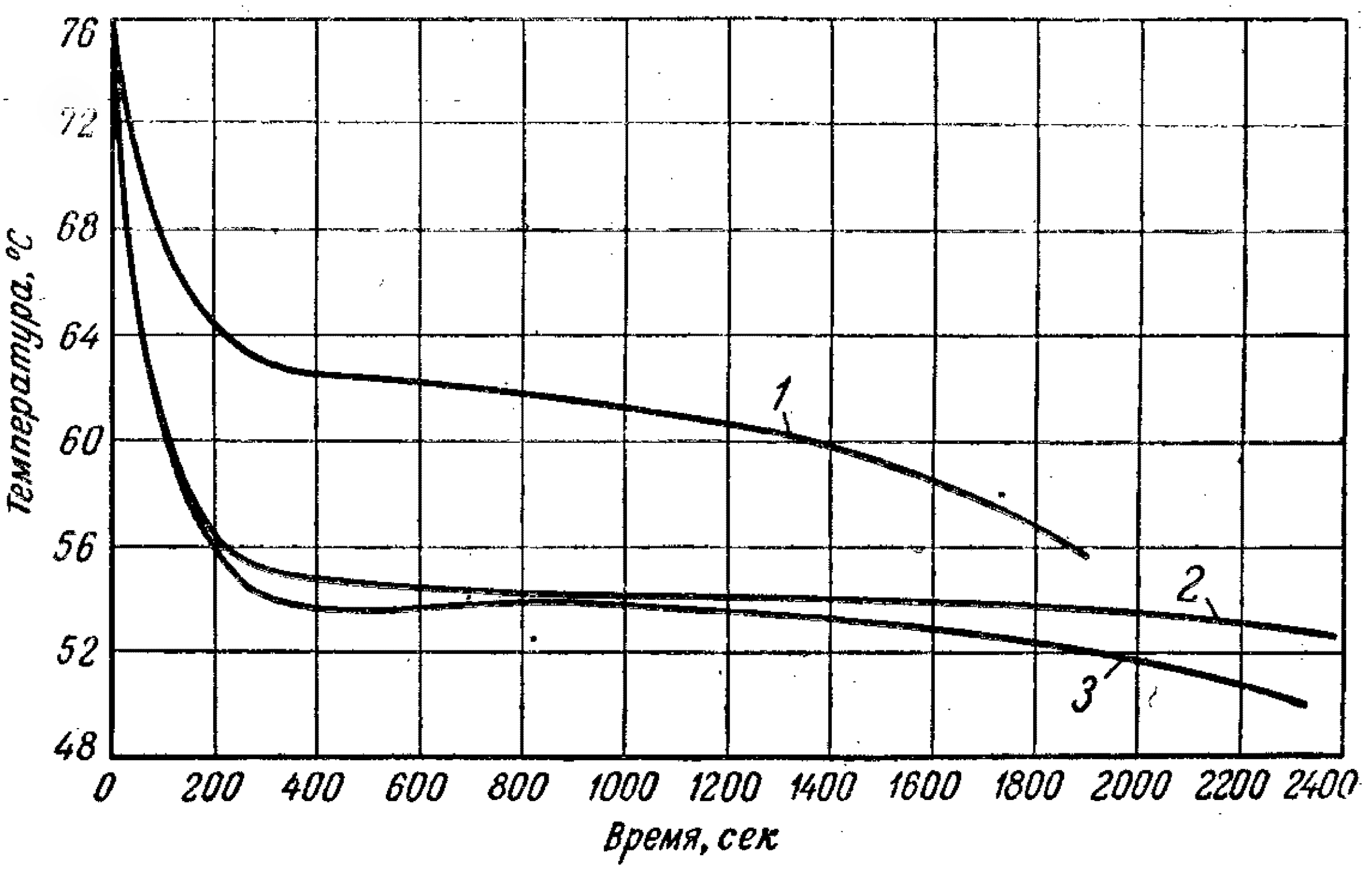


Рис. 40. Кривые охлаждения термопластичных веществ. Температура охлаждающей воды 25° С.
1 — пчелиный воск; 2 — парафин; 3 — стеарин.

на — с 54—53° С. Интересно отметить, что у стеарина три участка кристаллизации: с 54 до 53,5° С; с 53,5 до 54° С и с 54 до 53° С. Это явление, по-видимому, связано с тем, что стеарин представляет собой смесь стеариновой (75%), олеиновой и пальметиновой кислот. На втором участке процесс кристаллизации сопровождается даже выделением тепла. Охлаждение и кристаллизация шликеров протекают значительно быстрее (рис. 41), нежели парафина, воска и стеарина. Скорости охлаждения шликеров при одинаковом составе технологической связки и близких значениях концентрации связки в шликере зависят от состава керамического материала. Быстрее других охлаждается шликер из порошка материала Т-900 и медленнее всех шликер из порошка материала ГК-20, что хорошо согласуется с вышеприведенными данными значений литейной способности этих шликеров (табл. 24). Следует отметить, что объемная концентрация связки в шликере из порошка материала ТК-20

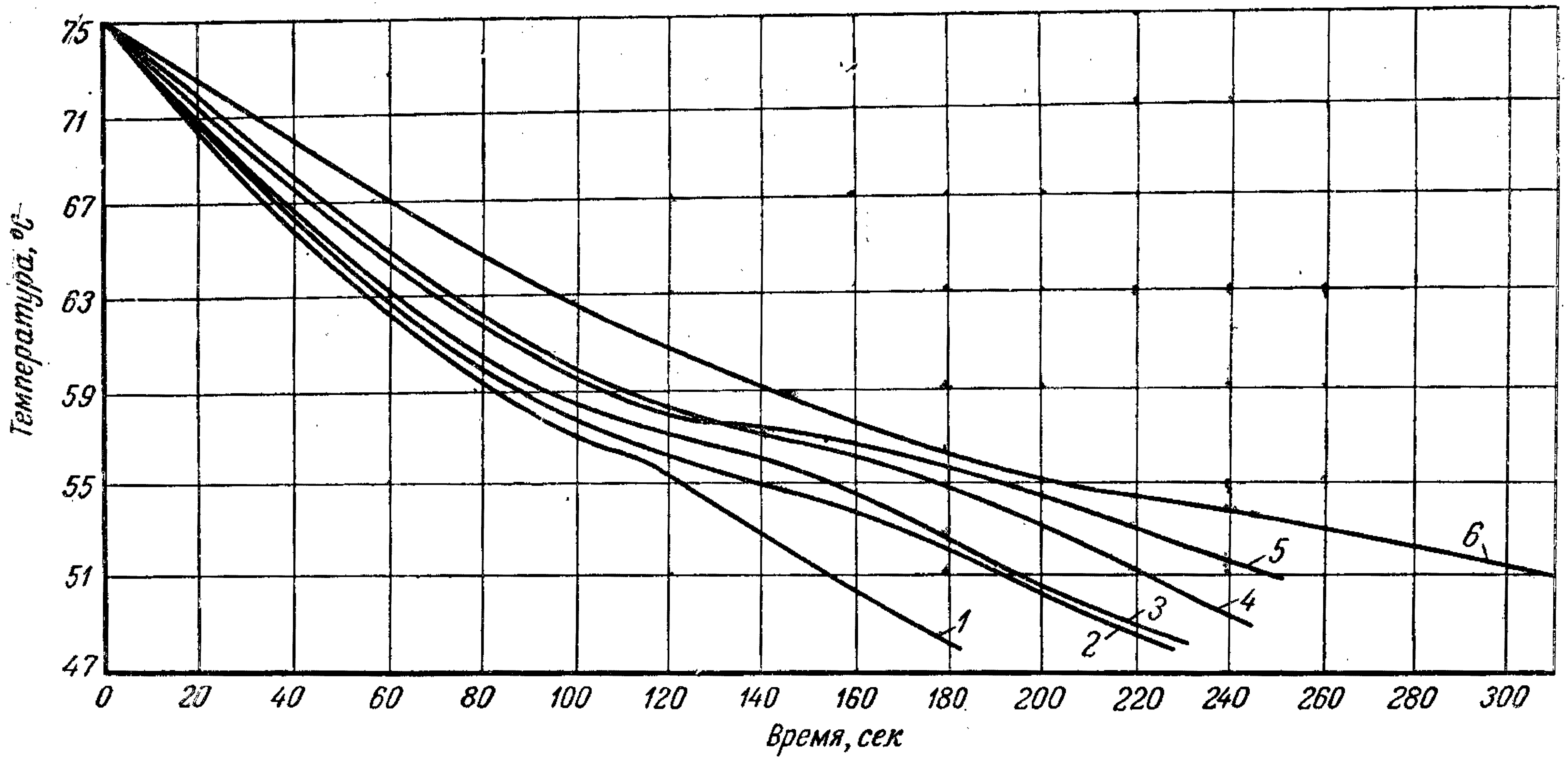


Рис. 41. Кривые охлаждения шликеров из порошков материала.
Состав связки: 90% парафина, 10% воска. Объемная концентрация связки в системе 23—26%. Температура охлаждающей воды 40° С.

1 — Т-900; *2* — Т-150; *3* — Т-80; *4* — ТК-20-80; *5* — СМ-1; *6* — ТК-20.

меньше, чем в шликере из порошка материала Т-900. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что скорость отвердевания шликера зависит от теплопроводности керамического порошка, входящего в его состав. Этим же, очевидно, можно объяснить относительно небольшую литейную способность шликера из порош-

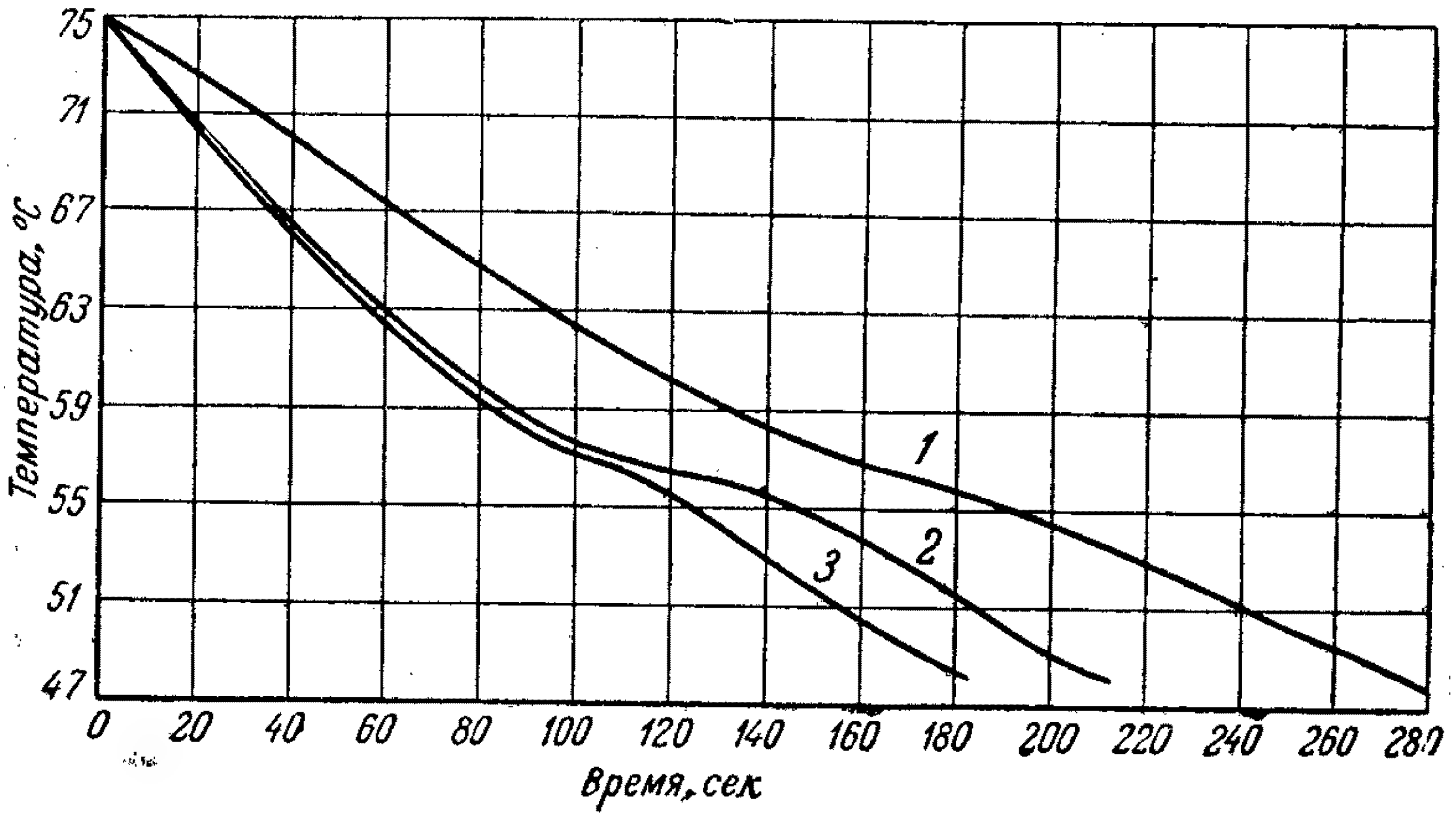


Рис. 42. Кривые охлаждения шликера из порошка материала Т-900 при различных составах связки.

1 — 90% парафина, 5% воска, 5% стеарина; 2 — 90% парафина, 7% воска, 3% стеарина; 3 — 90% парафина, 10% воска.

ка материала Т-900 при малой вязкости шликера и большую литейную способность шликера из порошка материала ТК-20 при большой вязкости (табл. 24). Небольшие добавки стеарина в шликер из порошка материала Т-900 несколько уменьшают скорость его кристаллизации (рис. 42). Аналогичный результат был получен после добавки стеарина в шликеры из порошков материалов ТК-20, ТК-20-80, Т-80, Т-150 и СМ-1.

Величина объемной усадки постоянна для данного шликера и определяется главным образом концентрацией связки и ее составом. В связи с тем, что объемная усадка может привести к появлению в отливке при ее формообразовании трещин, раковин и рыхлот, естественно стремление к созданию шликеров с минимальной усадкой. Известно, что такими системами являются шликеры с максимальным коэффициентом упаковки или минимальным содержанием связки. Однако уменьшение содержания связки в шликере одновременно приводит

к повышению его вязкости и уменьшению скорости отвердевания, т. е. снижению литейной способности. В то же время для обеспечения возможности заполнения формы при литье заготовок конденсаторов с толщиной стенок 0,1—0,4 *мм* необходимы шликеры с определенной, достаточной для этих целей, литейной способностью. Поэтому концентрация связки в шликерах выбиралась экспериментально, исходя как из соображений снижения объемной усадки при охлаждении, так и необходимости получения заданной литейной способности. Необходимое значение литейной способности при выбранном режиме литья в зависимости от высоты и толщины стенки отливаемого изделия показано на рис. 43.

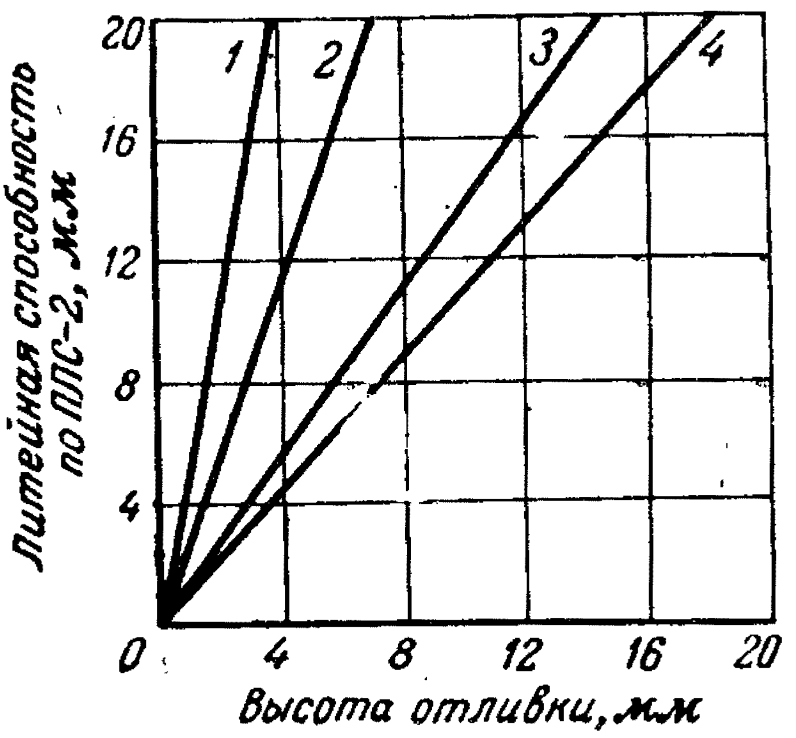


Рис. 43. Зависимость высоты отливки от литейной способности шликера при различных толщинах стенок отливки.

1 — 0,1 *мм*; *2* — 0,2 *мм*; *3* — 0,3 *мм*; *4* — 0,4 *мм*.

В табл. 25 приведены значения объемных и весовых концентраций связки в шликерах, при которых литейная способность обеспечивала при соответствующих режимах литья заполнение литейных форм конденсаторов типа КЛГ с толщинами пластин от 0,2 до 0,42 *мм*. Несколько повышенное содержание связки в шликерах из порошков материалов Т-80, Т-150 и Т-900 объясняется большой скоростью отвердевания этих шликеров. Весовое количество связки в шликерах X при известном объемном X_0 подсчитывается по удельным весам материала $d_м$ и технологической связки $d_с=0{,}9$:

$$X=\frac{X_0 d_с\cdot 100}{(100-X_0)\,d_м+d_с X_0}. \qquad (22)$$

Объемная усадка шликера ΔV определяется по величинам объемных весов твердого ($\gamma_т$) и жидкого ($\gamma_ж$) шликера [Л. 8]:

$$\Delta V=\frac{\gamma_т-\gamma_ж}{\gamma_т}. \qquad (23)$$

В табл. 26 приведены значения объемных усадок шликеров из различных конденсаторных материалов.

Таблица 25

Наименование материала порошка	Удельный вес порошка, $г/см^3$	Концентрация связки в шликере, %		Состав связки
		Объемная	Весовая	
ТК-20 ТК-20-80 ТК-80 Т-150	4,40 4,4 4,0 4,0	24,6 24,6 26,8 26,8	6 6 7 0 7,0	Парафин 90%, воск 10%
Т-900 СМ-1	5,3 5,3	27,2 25,4	5,8 5,5	Парафин 88%, воск 10%, стеарин 2%

Наряду с возможностью появления раковин и пустот в отливке в результате объемной усадки шликера при охлаждении не исключена также возможность образования в шликере воздушных включений в процессе его приготовления. Эти воздушные включения в той или дру-

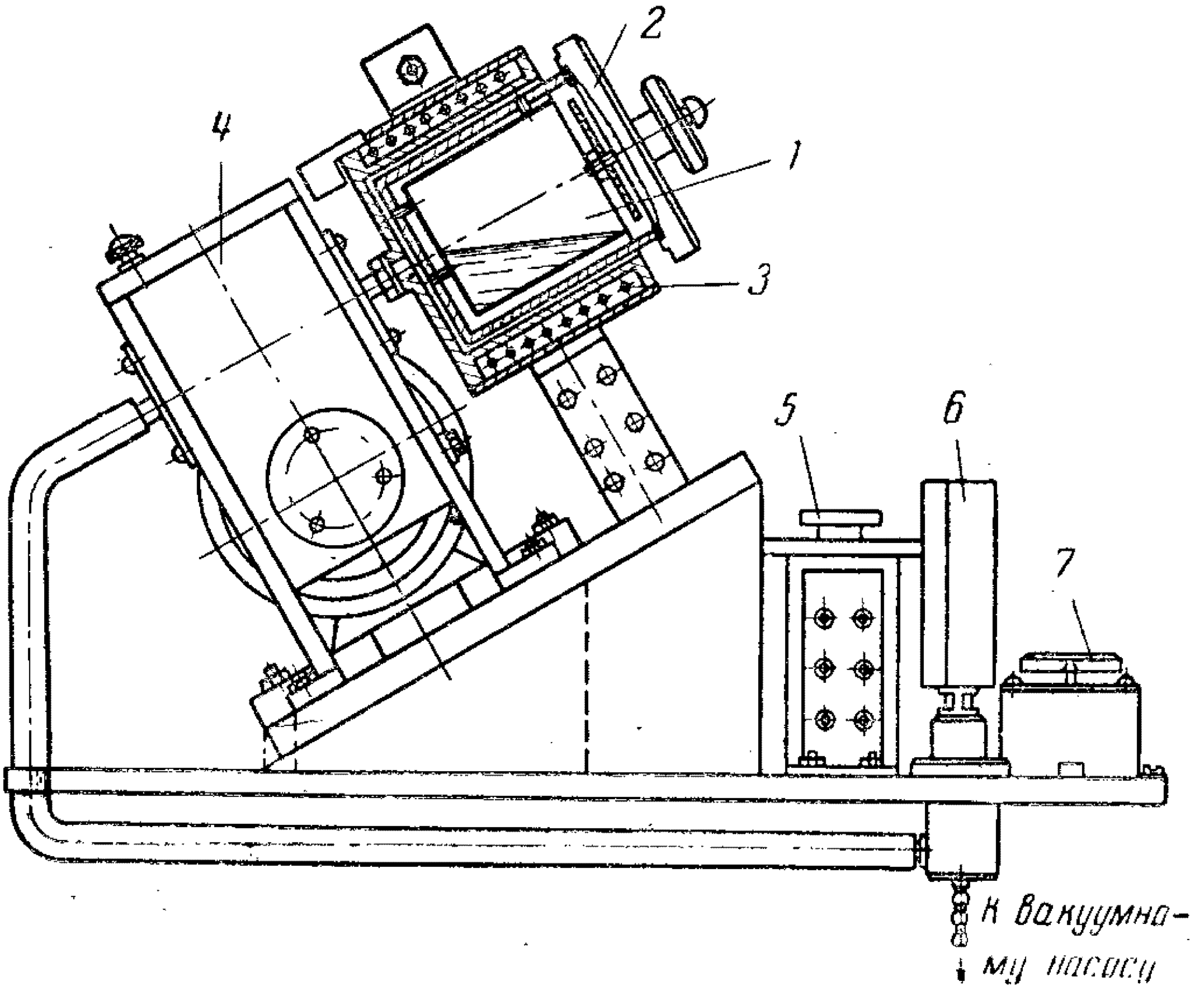


Рис. 44. Ротационная вакуумная мешалка.

1 — бачок с расплавом; *2* — крышка; *3* — обогреватель; *4* — мотор; *5* — переключатель; *6* — вакуумметр; *7* — автотрансформатор.

гой степени могут быть удалены из системы путем вакуумирования шликера в ротационной вакуумной мешалке (рис. 44). Критерием эффективности вакуумиро-

Таблица 26

Шликеры из порошков материалов	Удельная суммарная поверхность, $см^2/см^3$, порошка	Объемная концентрация связки, %	Полная объемная усадка, %
ТК-20	27 000±500	24,6	3,58
Т-80	27 000±500	26,8	3,62
Т-150	27 000±500	26 8	3,76
Т-900	27 000±500	27,2	4,15
СМ-1	27 000±500	25,4	4,26

вания может служить электрическая прочность и качество конденсаторов, изготовленных из шликеров, подвергавшихся различной длительности вакуумирования. Из рис. 45 видно, что 45—60 *мин* вакуумирования достаточно для получения желаемого результата.

Рассмотрим свойства шликеров применительно ко второму этапу технологической схемы, а именно — термической обработке литой заготовки. Основным свойством шликера, определяющим характер термической обработки, является его устойчивость против деформации при нагревании. Известно, что критерием такой устойчивости может служить предельное напряжение сдвига. Установлено также, что предельное напряжение сдвига шликеров, предварительно структурированных охлаждением, в несколько раз превышает предельное напряжение сдвига шликеров, не подвергавшихся такой обработке [Л. 10]. Выше отмечалось, что для заготовок конденсаторов типа КЛГ должны использоваться шликеры

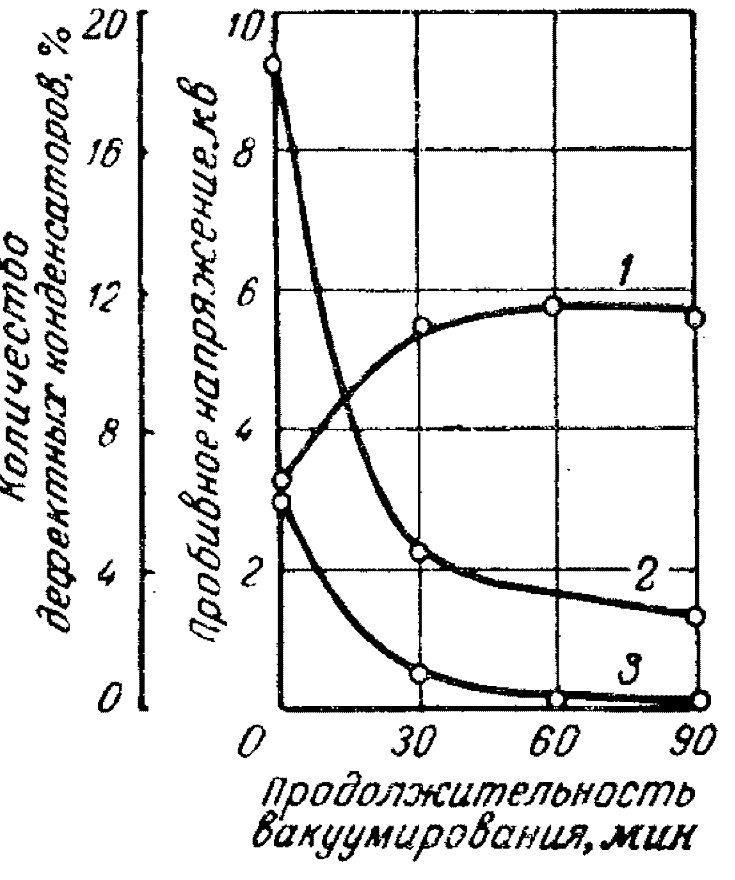


Рис. 45. Качество отливки в зависимости от продолжительности вакуумирования шликера.
1 — пробивное напряжение; 2 — количество конденсаторов, имеющих наружные дефекты; 3 — количество короткозамкнутых конденсаторов.

Состав технологической связки	Температура, °C	Статическое предельное напряжение			
		ТК-20		ТК-20-80	
		σ_s	σ_{0s}	σ_s	σ_{0s}
90% парафина, 10% воска	70	1 172	1 210	947	1 240
	80	1 063	1 173	947	1 190
	90	841	954	900	1 150
88% парафина, 10% воска, 2% стеарина	70	902	1 090	735	980
	80	711	977	695	898
	90	465	768	653	980

с большой литейной способностью. Измерение статического предельного напряжения сдвига шликеров производилось на вискозиметре Воларовича после выдержки шликера в течение 30 *мин* в покое. Груз P постепенно увеличивался до значения, при котором начинал вращаться внутренний цилиндр вискозиметра. Значение P_s соответствует статическому предельному напряжению сдвига:

$$\sigma_s = K_1 P_s, \tag{24}$$

где K_1 — постоянная прибора:

$$K_1 = \frac{Kg}{2\pi r_1^2 h + \frac{\pi r_1^3}{2}}. \tag{25}$$

Статическое предельное напряжение сдвига шликеров, предварительно структуированных охлаждением, определялось следующим образом: шликер охлаждался от температуры 70—100 до 20° С, затем выдерживался при 20° С в течение часа, вновь разогревался до температуры 70—100° С, и при этой же температуре после 10 *мин* выдержки определялся груз P_{0s}, которому соответствовало:

$$\sigma_{0s} = P_{0s} K_1. \tag{26}$$

Значения предельных напряжений сдвига шликеров из порошков материалов ТК-20, ТК-20-80, Т-80, Т-150, Т-900 и СМ-1 приведены в табл. 27. Из полученных результатов видно, что для исследуемых шликеров харак-

сдвига шликеров из порошков различных материалов, $Г/см \cdot сек^2$

Т-80		Т-150		Т-850		СМ-1	
σ_s	σ_{0s}	σ_s	σ_{0s}	σ_s	σ_{0s}	σ_s	σ_{0s}
610	870	205	1 065	1 890	6 749	12 400	21 120
551	750	200	847	542	6 040	8 870	17 700
490	670	146	653	565	1 810	5 810	11 000
416	435	389	597	2 500	2 880	1 205	1 350
379	298	352	597	1 065	1 970	1 205	1 290
342	379	333	561	675	1 670	1 120	1 205

терно увеличение их статического предельного напряжения сдвига после структурирования охлаждением. Добавка в эти шликеры стеарина (0,2%) приводит к уменьшению статического предельного напряжения сдвига шликеров. У шликеров из порошков материалов Т-900 и СМ-1 наиболее высокие значения статического предельного напряжения сдвига и наиболее резко выражена зависимость его от температуры. У шликера из порошка материала ТК-20, несмотря на большую вязкость (табл. 24), небольшое предельное напряжение сдвига.

На основании полученных результатов естественно было предположить, что шликеры с малыми предельными напряжениями сдвига, особено такие, в состав которых входит стеарин, менее устойчивы к деформации при нагревании, чем шликеры с большим предельным напряжением сдвига. Исключение, очевидно, должны были составить шликеры из порошка материала Т-900 и СМ-1, у которых даже после добавки в них стеарина предельное напряжение сдвига осталось относительно высоким. Это предположение подтвердилось экспериментом (см. рис. 63).

8. ЛИТЬЕ ЗАГОТОВОК

Литье — технологическая операция, которая в значительной мере определяет качество конденсаторов типа КЛГ. Размеры и конфигурация отливки в основном определяются конструкцией керамического корпуса конденсатора (рис. 2). При этом все размеры отливки должны быть увеличены по отношению к размерам гото-

вого конденсатора с учетом огневой усадки (уменьшения объема отливки), образующейся при термической обработке отливки. Линейные размеры отливки определяются как произведение линейных размеров готового изделия на значение коэффициента усадки ($K_{ус}$). Величина

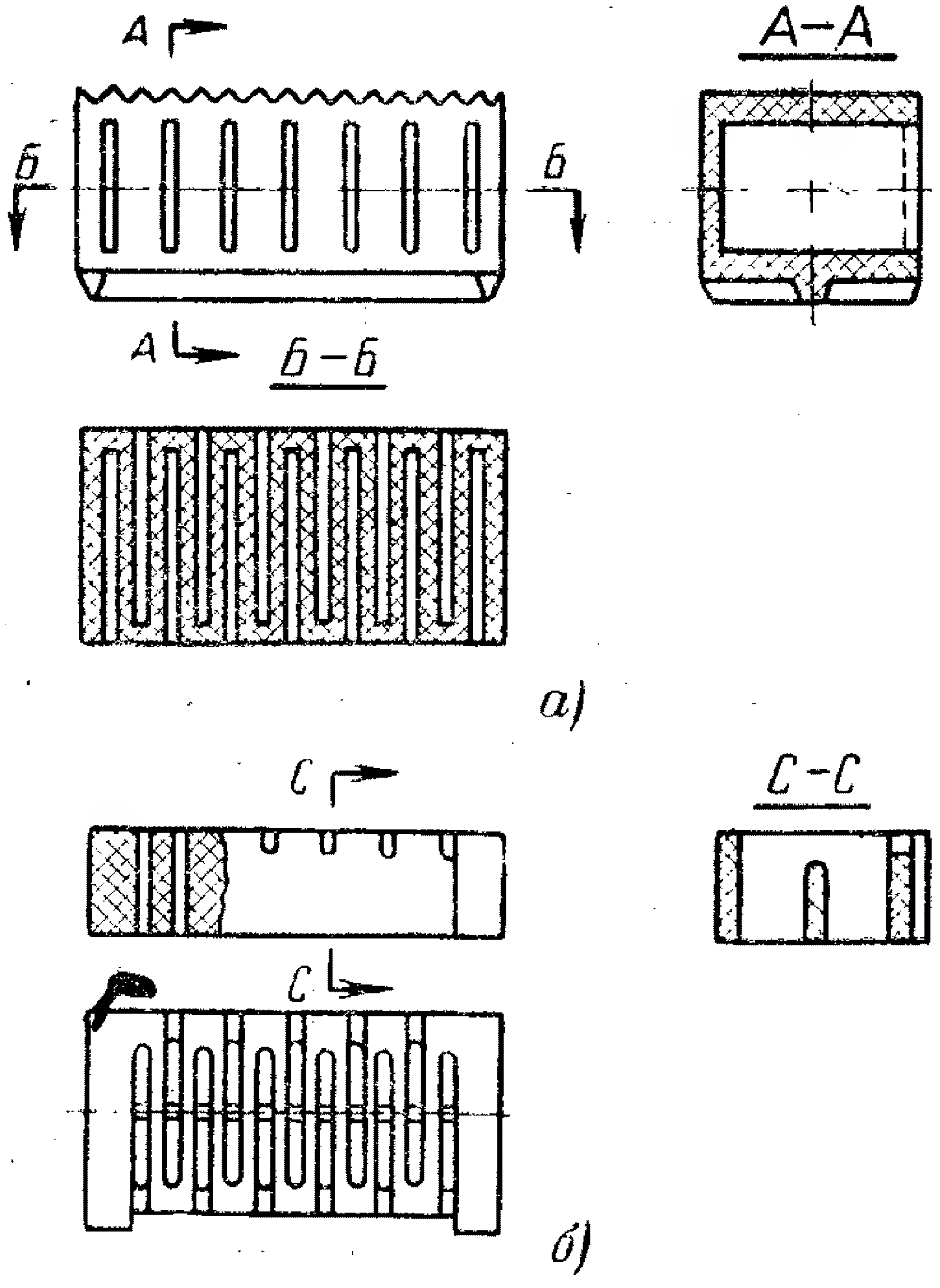


Рис. 46. Отливки КЛГ.
а — глухие прорези; *б* — сквозные прорези.

огневой усадки характеризуется коэффициентом упаковки отливки [Л. 10]. Для литья заготовок конденсаторов использовались шликеры с одинаковыми или близкими значениями коэффициента упаковки, поэтому коэффициенты усадки всех этих шликеров одинаковы ($K_{ус}=1{,}06$). Наряду с изменением размеров, связанным с огневой усадкой, заготовка КЛГ должна иметь припуск на шлифовку. Кроме того, в заготовке должны быть предусмотрены изменения конфигурации, вызываемые требованиями технологии литья и других технологических операций (например, литниковый прилив и др.). На рис. 46 приведены чертежи отливок КЛГ со

сквозными и глухими прорезями. Рассмотрение отдельных элементов конструкции этих отливок приведено ниже.

Основными параметрами, характеризующими качество отливки, являются: коэффициент упаковки $K_{уп}$, механическая прочность, объем внутренних раковин и пустот, точность геометрической формы и размеров. Применительно к отливке конденсаторов типа КЛГ эти параметры характеризуются следующими техническими требованиями:

1. Коэффициент упаковки $K_{уп}=0{,}73—0{,}76$.

2. Механическая прочность отливки должна быть достаточной, чтобы извлечь ее из формы без разрушения пластин (на пластинах отливки не должно быть трещин).

3. Объем внутренних раковин и пустот должен быть минимальным; не должно быть пор и раковин на пластинах и поверхности конденсатора.

4. Геометрическая форма и размеры должны соответствовать чертежу отливки.

Коэффициент упаковки $K_{уп}$ полуфабриката из данного материала определяется на стандартном образце в виде тонкостенной трубки. Механическая прочность определяется путем испытания стандартных литых образцов на изгиб, а также микроскопическим исследованием пластин на отсутствие трещин. Наличие или отсутствие внутренних раковин и пустот определяется путем расчленения по элементам (пластинкам) отливки и исследования под микроскопом. Одновременно одним из решающих показателей отсутствия такого рода дефектов у отливки является определение количества короткозамкнутых конденсаторов, которое производится после обжига, металлизации и шлифовки заготовок. Точность геометрической формы и размеров определяется соответствующими измерениями на микроскопе.

Основными факторами, влияющими на качество отливки, являются: состав и свойства шликера и условия литья, определяющие процесс заполнения формы и отвердевания отливки.

Составы и свойства шликеров, рассмотренные в предыдущем параграфе, определяют механическую прочность и $K_{уп}$ отливки, а также существенно влияют на процесс заполнения формы при литье (вязкость, литейная спо-

собность) и процесс отвердевания отливки (температура плавления, объемная усадка при охлаждении, скорость отвердевания). Процессы заполнения формы шликером и отвердевания отливки [Л. 10] зависят главным образом от: а) режимов литья, определяемых температурой шли-

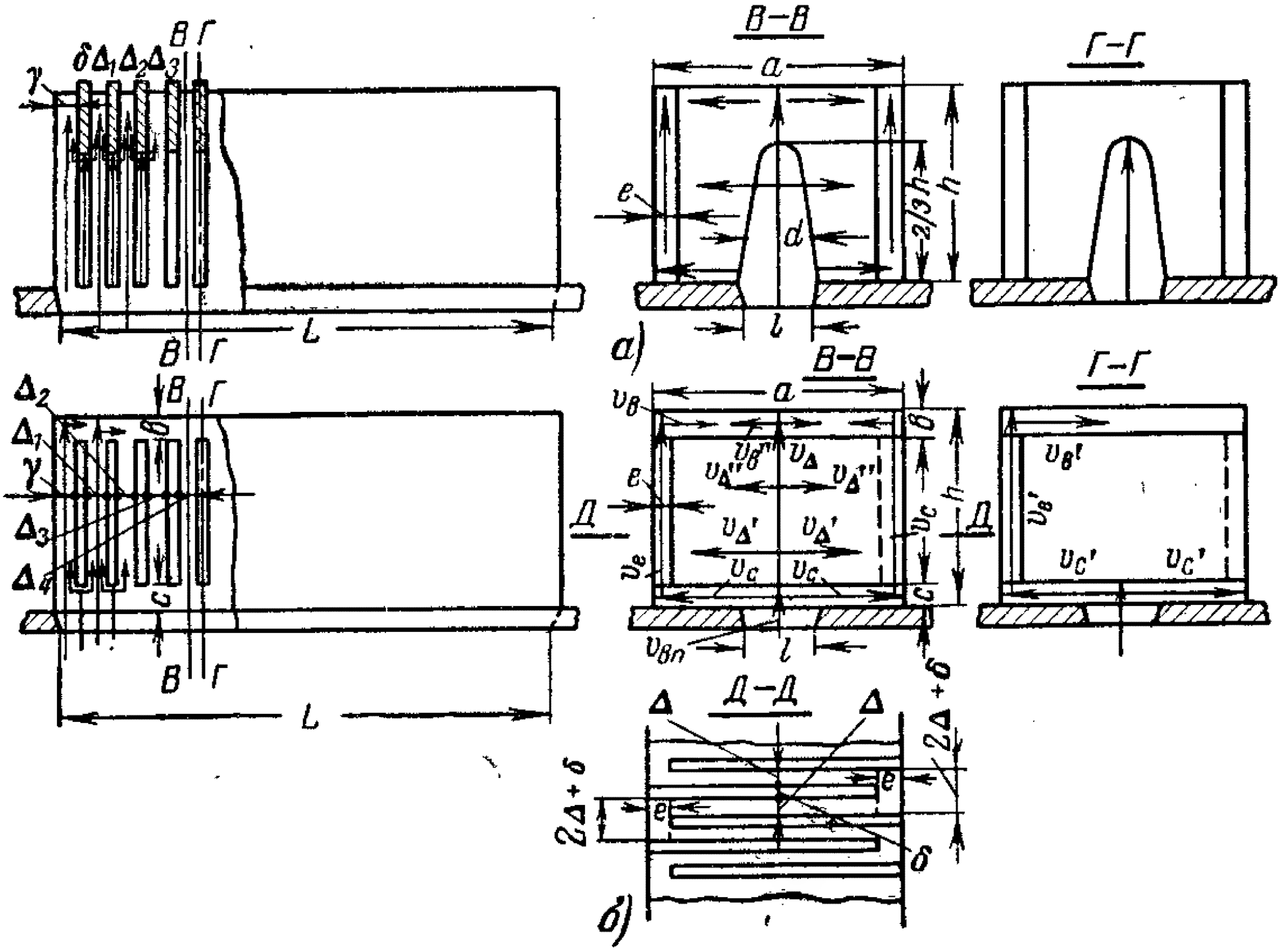


Рис. 47. Внутренняя (рабочая) полость формы для литья КЛГ.
а — сквозные прорези; *б* — глухие прорези.

кера при литье, температурой литейной формы, давлением, временем выдержки при литье, скоростью впуска и объемной скоростью заполнения; б) конструкции литейной формы и в первую очередь от литниковой системы (конфигурация, размеры, расположение), системы охлаждения, системы вентиляции и размеров рабочей полости; в) конструкции литейной машины.

Оценка влияния перечисленной совокупности факторов на качество отливки представляет собой сложную задачу, которая требует предварительного рассмотрения и анализа процесса заполнения шликером формы для литья заготовок и процесса отвердевания отливки в форме. Анализ механизма заполнения формы при литье КЛГ был проведен на основе представлений, развитых в технологии горячего литья керамических изделий [Л. 10].

На рис. 47 изображены схемы внутренних (рабочих) полостей литейных форм и возможные направления движения потоков расплава шликера, которые условно обозначены стрелками. Характер движения отдельных потоков расплава в различных элементах (полостях) литейной формы зависит от величины напора, абсолютной величины и соотношения размеров отдельных элементов формы, свойств расплава и целого ряда других факторов. Однако при всем многообразии факторов, влияющих на характер и направление движения отдельных потоков расплава, можно условно выбрать четыре основных варианта механизма заполнения формы в зависимости от последовательности и скорости движения этих потоков.

1. Все потоки движутся по каналам одновременно, и их линейные скорости в различных каналах ($\Delta_{1\div n}$ γ, b, c, e) полости формы при движении снизу вверх равны друг другу.

2. Потоки движутся в каналах не одновременно и скорости движения потоков расплава v_Δ, v_γ, v_b, v_c и v_e в каналах ($\Delta_{1\div n}$, γ, b, c, e) не одинаковы.

3. Скорость v_Δ движения потоков расплава в каналах $\Delta_{1\div n}$ меньше скорости (v_b, v_c и v_e) движения потоков в каналах b, c и e.

4. $v_\Delta > v_b$, v_c и v_e.

Несомненно, что перечисленные варианты не исчерпывают всех случаев механизма заполнения формы; их рассмотрения, однако, достаточно для оценки зависимости качества отливки КЛГ от механизма процесса заполнения.

Как видно из рис. 47, рабочие полости литейных форм (как со сквозными прорезями, так и с «глухими» прорезями) разделяются пластинами пуансонов, имеющих толщину δ, на серию одинаковых каналов (секций) с проходным сечением $\Delta(a—2e)$ и ряд каналов другого сечения (γ, b, c, e). Расплав поступает под давлением из литейной машины в полость формы через литниковое отверстие прямоугольного сечения с размерами $L \times l$. Поток расплава при поступлении в полость формы встречает на своем пути пластины пуансонов и разделяется на ряд отдельных потоков. Направление и скорость движения этих потоков определяются конфигурацией рабочей полости формы и размерами отдельных ка-

налов (Δ, γ, b, c, e и т. д.). Выбранные на основе проведенных исследований соотношения размеров рабочей полости литейной формы КЛГ приведены в табл. 28. Эти соотношения выражены через величину Δ, являющуюся основной в конфигурации конденсатора типа КЛГ.

Таблица 28

Геометрические размеры	Для КЛГ с глухими прорезями	Для КЛГ со сквозными прорезями
L	(3—40) Δ	(3—40) Δ
l	(3—5) Δ	(3—5) Δ
h	(8—15) Δ	(8—15) Δ
a	(10—20) Δ	(10—30) Δ
δ	(0,3—0,5) Δ	(0,3—0,5) Δ
γ	1,1 Δ	(1,2—1,5) Δ
b	(1,2—1,6) Δ	—
c	(1,2—1,6) Δ	—
e	(0,8—1,0) Δ	(1,2—2,2) Δ
d	—	(3—5) Δ

На рис. 48, 49 приведены некоторые схемы механизма заполнения отдельных каналов (секций) литейной формы КЛГ в зависимости от последовательности и скорости движения потока расплава в различных каналах.

Рассмотрим на примере заполнения литейных форм КЛГ с «глухими» прорезями, от чего зависит и как происходит заполнение формы расплавом. Из литейной машины в канал литника ($L\times l$) поступает расплав. Объем расплава, поступающего в литник за единицу времени, т. е. объемная скорость заполнения, зависит от напора (давления, создаваемого в литейной машине), вязкости расплава и сопротивления движению потока. Поток расплава, пройдя литниковое отверстие, поступает снизу вверх в рабочую полость литейной формы с линейной скоростью

$$v_{\text{вп}} = K\frac{V_{з}}{S}. \qquad (27)$$

где $v_{\text{вп}}$ — линейная скорость движения потока, называемая скоростью выпуска, *см/сек*;

$V_з$ — объемная скорость заполнения, *см³/сек*;

S — площадь сечения литникового отверстия, *см²*;

К — коэффициент, учитывающий потери на сопротивление движению потока.

На пути *с* (рис. 47) поток движется вверх со скоростью $v_{вп}$. Затем, встречая торцы пуансонов (δ) и уменьшенное проходное сечение S_2, поток разделяется на не-

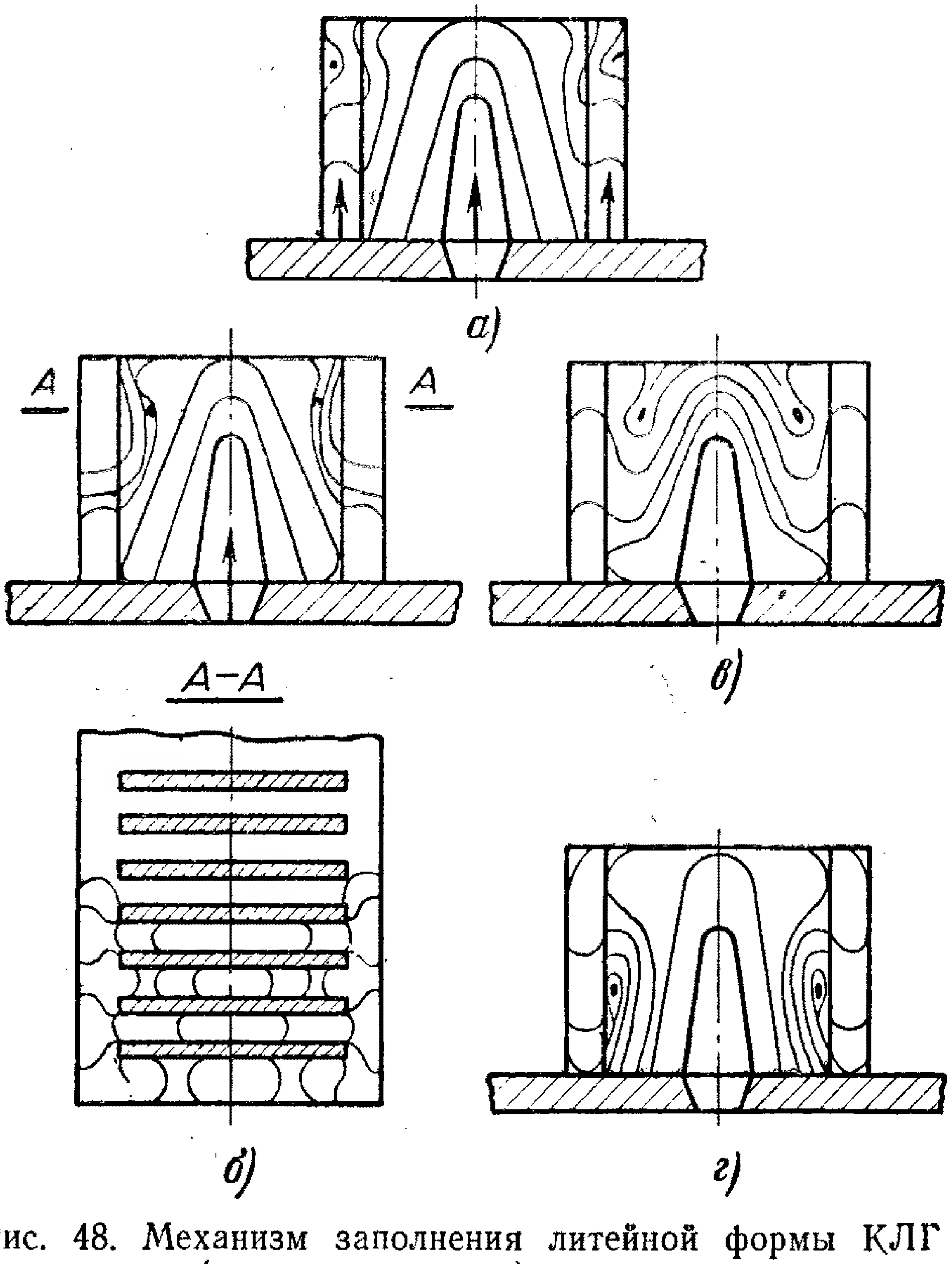


Рис. 48. Механизм заполнения литейной формы КЛГ (сквозные прорези) шликером.

сколько потоков, идущих вверх по каналам Δ, и два потока, идущих по каналам *с* с направлением, перпендикулярным первоначальному. Таким образом, при поступлении в рабочую полость формы расплав может одновременно двигаться по каналам *с* и каналам Δ. В зависимости от размеров этих каналов поток расплава встречает различное сопротивление движению (большее в меньшем канале и наоборот). В результате этого за-

полнение каналов будет происходить последовательно — сперва расплав начнет заполнять канал, оказывающий меньшее сопротивление движению потока; затем по мере

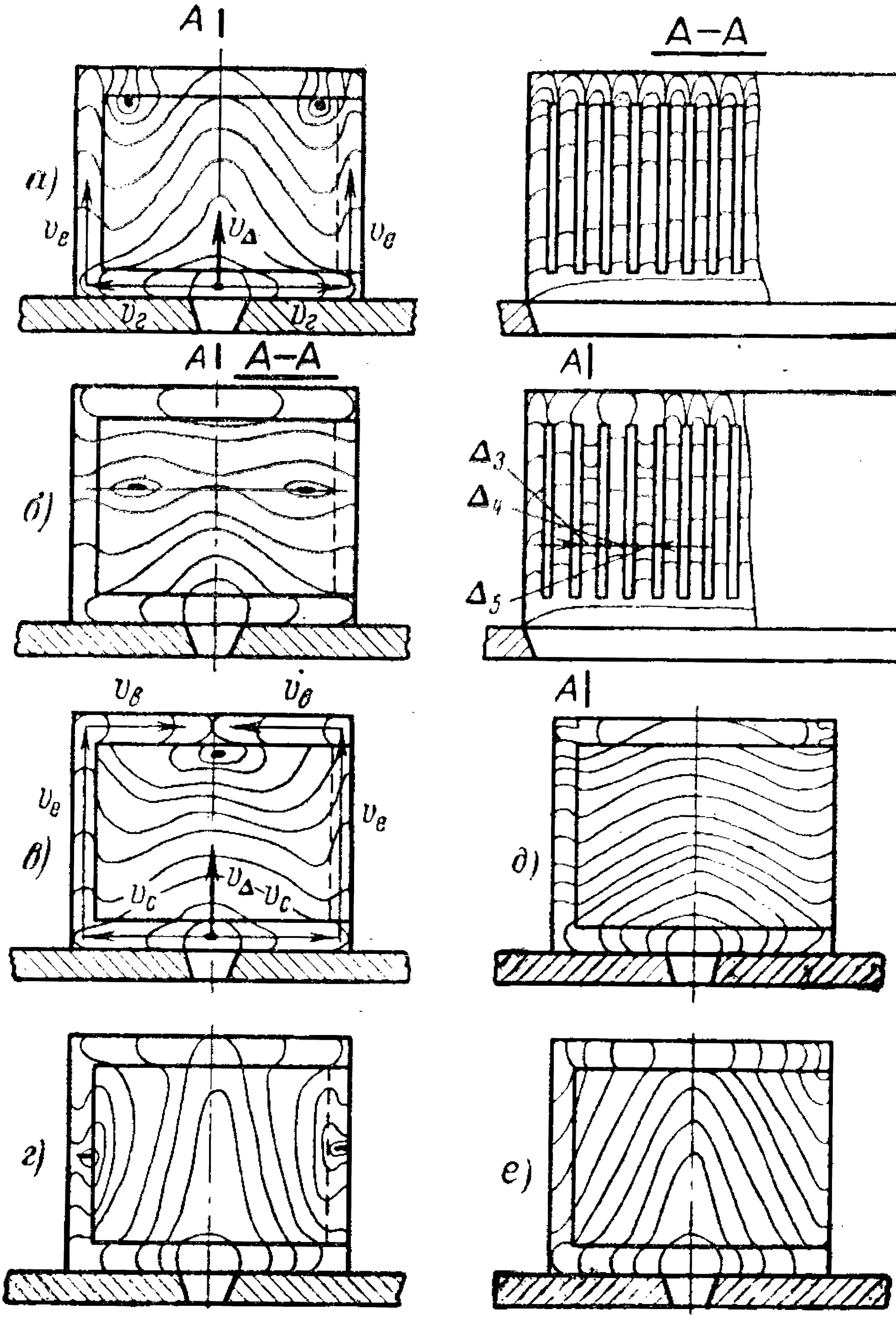


Рис. 49. Механизм заполнения литейной формы КЛГ (глухие прорези) шликером.

заполнения этого канала и возрастания в связи с этим сопротивления поток начнет заполнять другой канал, оказывающий эквивалентное сопротивление движению потока. Увеличение сопротивления движению потока в канале по мере его заполнения обусловливается увеличением поверхности трения и повышением вязкости

расплава из-за охлаждения его о стенки канала. Наиболее существенным является второе обстоятельство; в ряде случаев охлаждение потока расплава в канале может привести к полной остановке движения потока из-за отвердевания расплава. Величина сечения

$$S_2 = S_1 - n\delta l,\ см^2, \qquad (28)$$

составляет для крайнего случая $0{,}7\,S_1$ (n — число пуансонов).

Указанное легко подсчитать, подставив в формулу (29) значения соответствующих величин, выраженных через Δ (табл. 28). Уменьшение величины проходного сечения полости формы в направлении движения потока, а также частичная преграда в виде торцов пуансонов заставляют часть потока изменить направление движения и заполнять канал *с* в обе стороны от литника. Одновременно продолжается движение потока в центре вверх по каналам Δ. Величина проходного сечения канала *с* $S_3 = Lc,\ см^2$, составляет $0{,}3\,S_1$. Так как поток расплава движется в обе стороны от литника (рис. 49, сечение *В—В*), то общее сечение канала *с* для потока составит $0{,}6\ S_1$, т. е. примерно то же значение, что и для каналов Δ. Двигаясь по каналу *с*, поток достигает боковой стенки формы, которая направляет его движение по каналу *е* вверх. При этом поток разделяется пуансонами на ряд потоков, число которых равно $n/2$. Проходное сечение единичного канала *е* существенно отличается от сечения канала Δ (см. рис. 47,*б*, сечение *Д—Д*) и равно $Se = 2{,}5\ \Delta e,\ см^2$. Суммарное (по всей длине конденсатора) сечение канала *е* меньше сечения канала *с* и равно: $S_4 = 1{,}25\ \Delta\ en \cong 0{,}17\ S_1,\ см^2$. В связи с этим сопротивление движению потока, перемещающегося из канала *с* в канал *е*, возрастает, и часть расплава начинает заполнять и двигаться вверх в смежных каналах Δ. Достигнув верхней стенки формы (торца выталкивателя), потоки из каналов *е* меняют направление движения к центру формы по каналу *в*, а центральные потоки, двигавшиеся по каналам Δ, достигнув той же верхней стенки, начинают двигаться по каналу *b* от центра, к боковым стенкам. Эти потоки движутся навстречу друг другу, вплоть до их слияния. Графическое изображение описанного процесса заполнения формы приведено на рис. 49. При этом необходимо от-

метить, что схема на рис. 49,*а* справедлива лишь для случая, когда $v_\Delta = v_c = v_e = v_b$, т. е. скорости движения потоков по всем каналам равны друг другу. Схемы механизма заполнения формы при других соотношениях скоростей движения потоков приведена на рис. 49,*б*, *в*, *г*.

Выше был рассмотрен механизм процесса заполнения формы КЛГ, протекающий в плоскости пластины Δ и по каналам *b*, *с* и *е* в той же плоскости. Необходимо проследить также процесс заполнения формы в сечении, перпендикулярном пластинам Δ. В этом сечении полость формы, как видно из рис. 47,*б*, имеет ряд каналов Δ и два канала γ (по краям формы). Так как длина литникового отверстия *L* равна длине рабочей полости формы, заполнение всех каналов Δ и γ потоком расплава, выходящим из литника со скоростью $v_{\text{вп}}$, начинается почти одновременно. При равенстве скоростей движения потоков в каналах Δ и γ расплав, выйдя из каналов Δ и γ, поднимается на высоту *b*, встретив верхнюю стенку формы (торец выталкивателя), сольется воедино над пластинами пуансонов (рис. 49,*а*, сечение *А—А*). Если же различны скорости движения потоков в каналах Δ и γ, то поток, имеющий бóльшую скорость движения, нежели соседние потоки, выйдет из канала Δ и, достигнув верхней стенки формы, начнет растекаться в обе стороны по каналу *b*, а затем вниз по соседнему каналу Δ (рис. 49,*б*). Из изложенного следует, что: 1) заполнение формы осуществляется в результате движения ряда потоков по каналам Δ, *с*, *е*, *b* и γ с последующим их слиянием воедино; 2) в зависимости от соотношения размеров каналов и скоростей движения потоков (v_c, v_e, v_b, v_Δ) меняется место слияния потоков.

Как уже упоминалось, при заполнении рабочей полости формы расплавом из полости вытесняется находящийся в ней воздух, оказывающий определенное противодействие заполнению формы расплавом. Для удаления воздуха в конструкции формы предусматриваются воздушные каналы, через которые воздух вытесняется наружу [Л. 10]. Если таких каналов нет, то тот или иной участок формы может быть не заполнен полностью расплавом. В связи с этим большое значение имеет место слияния потоков расплава, заполняющих форму. В месте слияния потоков всегда должен быть выход воздуха, в противном случае потоки не сольются

из-за образовавшейся воздушной «пробки». При слиянии потоков на пластине Δ в ней образуется воздушный «пузырек» — отверстие (см. рис. 49,*а*, *б*, *в*,). При слиянии потоков на боковых поверхностях рабочей полости формы, в местах, где нет воздушного канала, может образоваться «недолив», т. е. нарушение геометрической формы отливки. Наличие нескольких потоков, а следовательно, неизбежная необходимость их слияния воедино при заполнении литейной формы может приводить также к так называемым «неслитинам», образующимся в местах неполного слияния потоков (при значительном снижении температуры расплава).

Из сказанного следует, что при литье должен быть такой механизм заполнения формы, при котором слияние потоков происходит в специально предусмотренных в конструкции литейной формы местах, снабженных каналами для выхода воздуха, и такая последовательность и скорость заполнения отдельных участков рабочей полости формы, которые обеспечивают полноценное заполнение формы. Схемы механизма заполнения, отвечающие этим требованиям, приведены на рис. 49,*д*, *е*. Для получения заданной схемы заполнения необходимы определенные соотношения размеров каналов и скоростей движения потоков, т. е. определенная очередность заполнения всех каналов полости формы.

Рассмотрим, от чего зависит скорость и очередность движения потоков в каналах формы и какими путями можно их изменять в процессе литья заготовок. Скорость движения потока в канале зависит, в первую очередь, от объемной скорости заполнения $v_{зап}$ и величины сечения каналов $S_к$. Если пренебречь неизбежными потерями, имеющими место в результате трения о стенки формы, противодействия вытесняемого воздуха и т. д., то скорость движения потока ($v_п$) можно выразить соотношением $v_п = v_{зап}/S_к$, *см/сек*. Следовательно, чем больше объемная скорость заполнения и чем меньше сечение канала, тем больше скорость движения потока.

Наряду с этим необходимо отметить, что в литейной форме из одного источника (литникового отверстия) заполняется несколько каналов различного сечения. Следовательно, заполнение этих каналов будет происходить не одновременно. В первую очередь поток расплава будет двигаться по каналам, оказывающим наименьшее со-

противление, т. е. по каналам наибольшего сечения, а в последнюю очередь по каналам наименьшего сечения. Это наглядно иллюстрируется кинограммами скоростной (3 000 кадров в секунду) киносъемки процесса заполнения прозрачной модели литейной формы КЛГ [Л. 12]. Указанное, однако, определяя очередность заполнения отдельных каналов рабочей полости формы, не опровергает справедливости вышеприведенной зависимости скорости движения потока от сечения канала и объемной скорости заполнения. Объемная скорость заполнения зависит от вязкости расплава, величины напора (давления) и потерь на преодоление сопротивления движению расплава в питателе литейной машины, литнике и полости формы. Величина $v_{зап}$ в зависимости от перечисленных факторов изменяется от 5 до 500 *см³/сек*. Соответственно время заполнения литейной формы КЛГ может изменяться от 0,05 до 0,0005 *сек*, а скорости движения потоков по отдельным каналам — от 70 до 25 000 *см/сек*. Следует отметить, что эти достаточно большие скорости, особенно с учетом малых размеров отливок, примерно на два порядка меньше критических скоростей для данных размеров каналов и вязкостей расплавов. Следовательно, режим течения при заполнении формы, как обычно при горячем литье керамических изделий, ламинарный.

Из вышесказанного следует, что регламентировать механизм заполнения формы варьированием скорости движения расплава в отдельных каналах формы затруднительно, так как высота отливки всего 0,4 *см*; наиболее удобным является регламентирование механизма заполнения выбором соответствующих соотношений размеров отдельных каналов формы, что, как упоминалось, обеспечивает определенную последовательность (очередность) заполнения отдельных каналов формы.

Наряду с перечисленными факторами механизм процесса заполнения формы зависит и от теплового режима литья. Расплав, перемещаясь в полости формы, охлаждается поверхностями рабочих элементов формы (пуансонов, обоймы, выталкивателя, поддона). Снижение температуры расплава (см. табл. 24) приводит к увеличению его вязкости, что в свою очередь вызывает уменьшение скорости его движения в каналах формы. Это приводит к увеличению времени контакта расплава

с поверхностью элементов формы и соответствующему повышению интенсивности охлаждения. Последнее приводит к прогрессивному возрастанию вязкости шликера вплоть до полного отвердевания.

Таким образом, рассмотренный выше механизм заполнения формы справедлив только в том случае, когда температурный режим литья (температуры расплава и формы) обеспечивает возможность полного заполнения формы и когда все элементы формы имеют одинаковую температуру в течение всего процесса заполнения формы и скорости движения расплава во всех каналах одинаковы. Практически это не выполнимо.

Поверхности рабочей полости формы обычно имеют различную температуру на отдельных участках. Например, температура боковых поверхностей рабочей полости формы всегда ниже температуры поверхностей пуансонов, так как теплоотвод у последних из-за малого сечения значительно хуже, чем у массивного корпуса формы. В результате этого даже при совершенно одинаковых размерах каналов между пластинами пуансонов и между корпусом формы и пластиной пуансона (крайние каналы) они будут заполняться не одновременно. За счет более интенсивного охлаждения и соответственно повышающейся вязкости расплава крайние каналы будут заполняться с отставанием. При наличии каналов различного сечения расплав будет более интенсивно охлаждаться в каналах меньших размеров, что приведет к дополнительному отставанию их заполнения. Различная температура на отдельных участках формы возникает также в результате неравномерности разогрева отдельных элементов формы потоком расплава при заполнении. Температура рабочих поверхностей формы будет изменяться также в зависимости от исходной температуры шликера, от места расположения и эффективности системы охлаждения формы и от темпа работы при литье (числа отливок, изготовленных в единицу времени). Следует особо отметить влияние темпа работы на изменение температуры формы. Увеличение темпа литья приводит к существенному повышению температуры поверхностей рабочей полости формы. При этом более сильно будут разогреваться поверхности каналов формы, по которым расплав шликера движется в первую очередь (т. е. расположенные ближе к литнику и имеющие

наибольшие проходные сечения). Изменение распределения температур в форме при изменении темпа работы приведет к изменению механизма заполнения формы.

Из приведенного анализа процесса заполнения формы расплавом шликера вытекает, что механизм заполнения формы определяется:

1. Соотношением и абсолютным значением размеров отдельных элементов и величин проходных сечений каналов формы, определяющих очередность заполнения каналов формы и место слияния потоков расплава.

2. Скоростью заполнения, зависящей от вязкости расплава, давления при литье и величины проходных сечений, определяющей режим течения потоков.

3. Системой вентиляции, позволяющей вытеснять воздух из полости формы, особенно в местах слияния потоков.

4. Тепловым режимом при литье, приводящим к изменению вязкости расплава в процессе заполнения и соответствующему изменению очередности заполнения отдельных каналов формы и места слияния потоков.

По окончании процесса заполнения формы шликер продолжает охлаждаться и отвердевает, образуя заготовку (отливку) конденсатора. Процесс отвердевания отливки в значительной мере определяет ее качество. Как известно, охлаждение шликера сопровождается уменьшением его объема. Существует понятие полной объемной усадки [Л. 10], которая складывается из наружной $\Delta V_н$, внутренней $\Delta V_в$ и компенсированной $\Delta V_к$:

$$\Delta V_п = \Delta V_н + \Delta V_в + \Delta V_к. \qquad (29)$$

Величина объемной усадки шликера при его охлаждении от температуры t_1 до t_3, как уже отмечалось выше, постоянна для данного шликера и определяется его физическими свойствами. Соотношение величин наружной, внутренней и компенсированной усадок изменяется в зависимости от конструкции отливаемой детали, конструкции формы и режима литья. Внутренняя усадка происходит при охлаждении шликера до температуры кристаллизации и при изменении его агрегатного состояния в момент кристаллизации. Внешне объемные изменения проявляются в этот период в образовании в отливке внутренних пустот и раковин. Наружная усадка происходит при охлаждении шликера от температуры кристаллизации до температуры охлаждения. Внешним ее

проявлением является уменьшение размеров отливки по сравнению с размерами формы. Часть объемной усадки в процессе охлаждения шликера в форме компенсируется непрерывным притоком расплава шликера и поэтому носит название компенсированной. Оптимальным следует считать такой процесс формообразования отливки, при котором внутренняя усадка полностью компенсируется. Степень компенсации внутренней усадки отливки зависит от расположения, конфигурации и размеров литникового канала и режима литья. Расположение, форма и размеры литникового канала должны обеспечивать непрерывный приток шликера в полость формы до момента полной кристаллизации отливки. Поэтому в случае литья заготовок КЛГ канал литникового отверстия расположен в центре, длина его равна длине оформляемой отливки, а ширина в 3—5 раз превосходит толщину пластин отливки (рис. 47, табл. 28). Режим литья и, в частности, режим охлаждения отливки в форме и время выдержки отливки под давлением должны быть подобраны таким образом, чтобы отвердевание отливки у литникового канала и в самом канале происходило в последнюю очередь и время выдержки обеспечивало компенсацию усадки в литнике.

Время, необходимое для отвердевания литника отливки конденсаторов типа КЛГ, составляет 1—3 *сек* в зависимости от скорости кристаллизации шликера. Для заготовок из медленно кристаллизирующихся шликеров, например из порошка материала ТК-20, оно ближе к 3 *сек*, а из порошка материала Т-80, Т-150 и Т-900 — к 1 *сек*. Время, необходимое для кристаллизации тонких пластин отливки, значительно меньше. Поэтому за указанное время 1—3 *сек* не только успевает полностью завершиться процесс кристаллизации всей заготовки, но происходит и наружная усадка отливки, уменьшаются ее размеры, и она плотно садится на пластины пуансонов. Поэтому распрессовка заготовок (или удаление из них пластин паунсонов) происходит с некоторым усилием, что может привести к появлению на пластинах заготовки трещин и даже к разрушению заготовки. Чем больше величины наружной усадки и коэффициента трения между отвердевшей отливкой и металлическими пластинами пуансонов, тем выше усилие при распрессовке и тем больше вероятность разрушения за-

готовки. С этой точки зрения большое влияние на усилие распрессовки должны оказывать свойства шликера, температура заготовки, степень чистоты поверхности пластин пунсонов и их форма. Экспериментально установлено, что повышение чистоты поверхности пластин пуансонов до 10—11 класса и наличие конусов на пластинах пуансонов до плоскости приводит к снижению усилия при распрессовке.

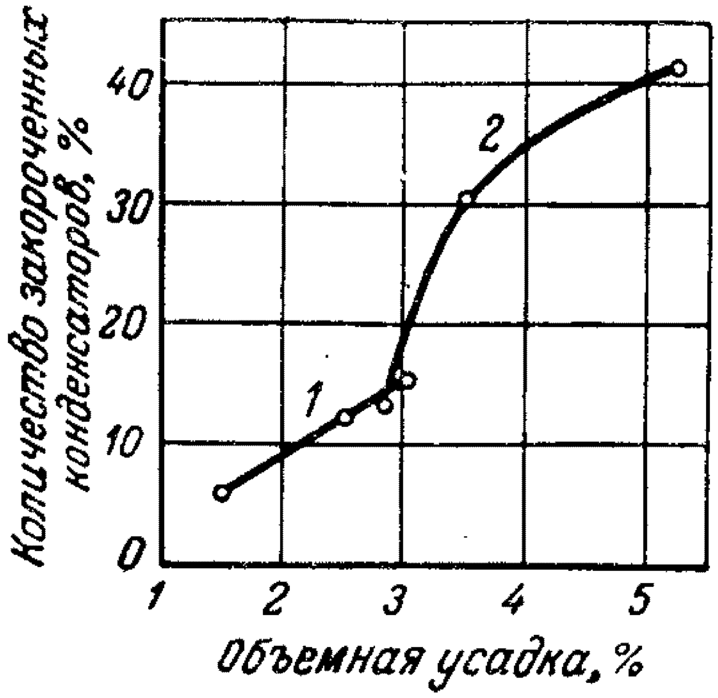


Рис. 50. Качество конденсаторов в зависимости от объемной усадки шликера.

1 — количество КЗ конденсаторов из материала ТК-20; *2* — то же из материала СМ-1.

К параметрам шликера, определяющим на данном этапе качество заготовки, следует отнести скорость кристаллизации, коэффициент трения, механическую прочность. Медленно кристаллизующиеся шликеры, обладающие малой объемной усадкой, малым коэффициентом трения и большой механической прочностью, будут, очевидно, оптимальными. Шликеры из порошков материалов Т-900 и СМ-1 оказались самыми неблагоприятными: первый — из-за большой скорости кристаллизации, а второй — из-за большой объемной усадки. Влияние величины объемной усадки на качество заготовки конденсатора наглядно иллюстрируется экспериментально установленной зависимостью количества дефектных конденсаторов от величины объемной усадки шликера (рис. 50). Изменение объемной усадки шлицера достигалось изменением концентрации связки в нем. Из рис. 50 видно, что с ростом усадки шликера резко увеличивается количество закороченных конденсаторов. Кроме того, было установлено, что усилие при распрессовке уменьшается с увеличением дисперсности порошка, входящего в состав шликера, и за счет этого повышается как качество заготовок (рис. 51), так и электрическая прочность конденсатора (рис. 52). Для уменьшения коэффициента трения между отливкой и пластинами пуансонов в состав шликеров из порошков материалов Т-900 и СМ-1 были

введены добавки стеарина. Небольшая добавка стеарина значительно уменьшает усилие при распрессовке заготовок и повышает их качество.

Рассмотрим влияние режима на процесс отвердевания отливки в форме и связанные с ним объемные из-

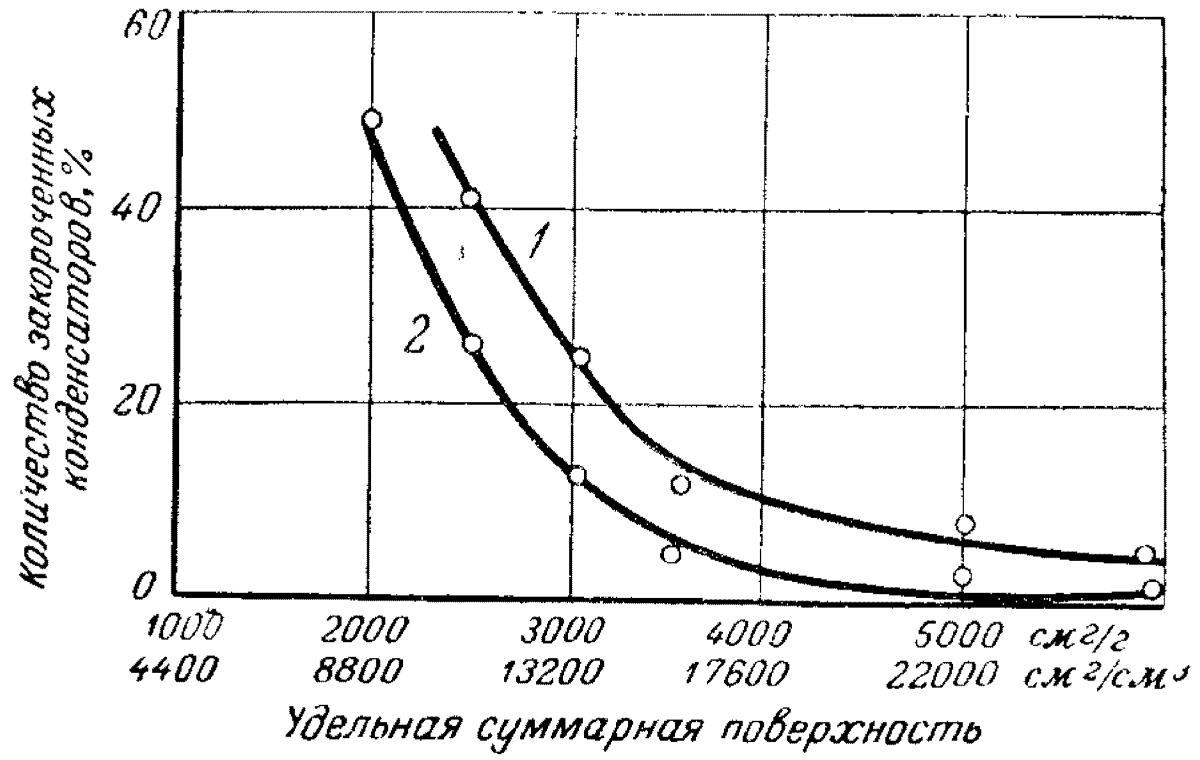


Рис. 51. Качество конденсаторов в зависимости от дисперсности порошка керамического материала ТК-20, входящего в состав шликера; толщина пластин конденсатора 0,2 *мм* (*1*) и 0,3 *мм* (*2*).

менения. Известно, что повышение температуры шликера и увеличение давления приводят к уменьшению наружной усадки [Л. 10]. С точки зрения уменьшения величины наружной усадки желательным является уменьшение отрезка времени от момента полного отвердевания отливки до момента ее извлечения из формы (распрессовки). Чем меньше это время, тем будет выше температура отливки (ближе к температуре кристаллизации) и, следовательно, меньше величина наружной усадки. Поэтому с точки зрения уменьшения усилия при распрессовке повышение температуры шликера и давления при литье желательно. Надо также отметить, что скорость охлаждения шликера тем меньше, чем выше температура формы. Поэтому при более высокой температуре формы до момента распрессовки (при постоянном темпе работы) произойдут меньшие объемные изменения шликера. Но вместе с тем механическая прочность отливки уменьшается с увеличением температуры формы.

Влияние режимов литья на процесс заполнения формы и качество отливки обусловлено тем, что литейная

способность шликера данного состава меняется с изменением его температуры, температуры формы и давления (табл. 21). С увеличением температуры шликера уменьшается его вязкость (табл. 24), увеличивается скорость впуска [Л. 10] и литейная способность. Кроме того,

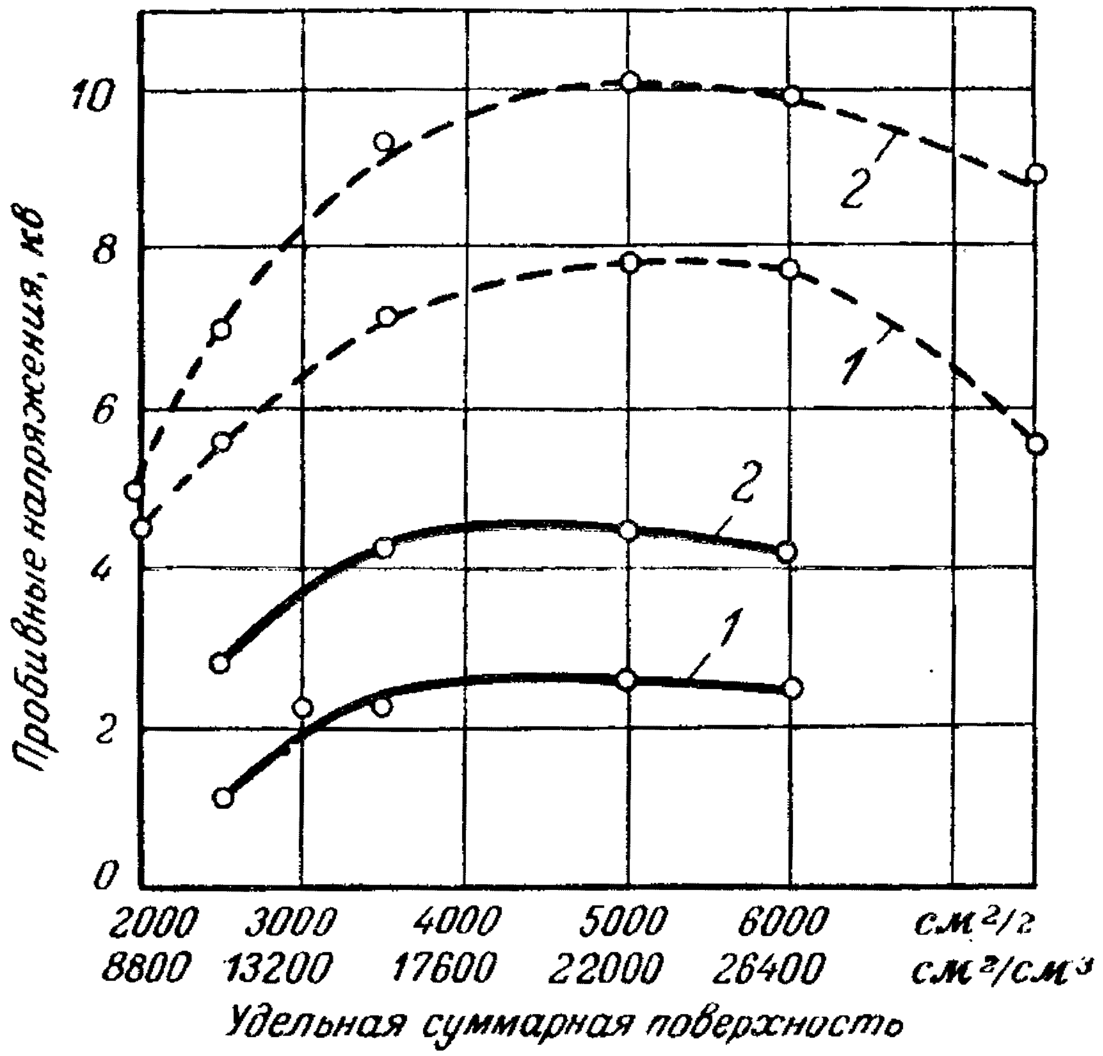


Рис. 52. Зависимость пробивных напряжений материала ТК-20 в однородном поле (— — — —) и конденсаторов типа КЛГ со сквозными прорезями (———) от дисперсности порошка, входящего в состав шликера. Толщина образцов в предполагаемом месте пробоя и пластин конденсаторов 0,2 (*1*), 0,3 *мм* (*2*).

повышение температуры шликера способствует лучшему слиянию отдельных потоков. Однако для маловязких шликеров, например из материала Т-150, уменьшение вязкости может повлечь за собой чрезмерное увеличение скорости впуска. При большой скорости впуска даже незначительная неточность в изготовлении формы, т. е. наличие разных проходных сечений, может привести к тому, что к моменту слияния потоков расплава воздух из формы не успевает удалиться и в месте слияния потоков образуется воздушное включение. С уменьшением температуры шликера увеличивается его вязкость и уменьшается литейная способность и скорость впуска и появляется возможность образования «недолива». На

рис. 53 показано, как с изменением температуры шликера изменяется количество дефектных заготовок. При низкой температуре шликера короткое замыкание пластин конденсатора вызвано тем, что в процессе металлизации слой металла закорачивает пластинки заготовки либо в месте недолива, либо по трещине на пластинке, либо в месте слияния потоков шликера в плохо сомкнутом шве. При высокой температуре шликера наличие короткозамкнутых пласти объясняется сквозными отверстиями на пластинах заготовки, образующимися в результате изменения механизма заполнения.

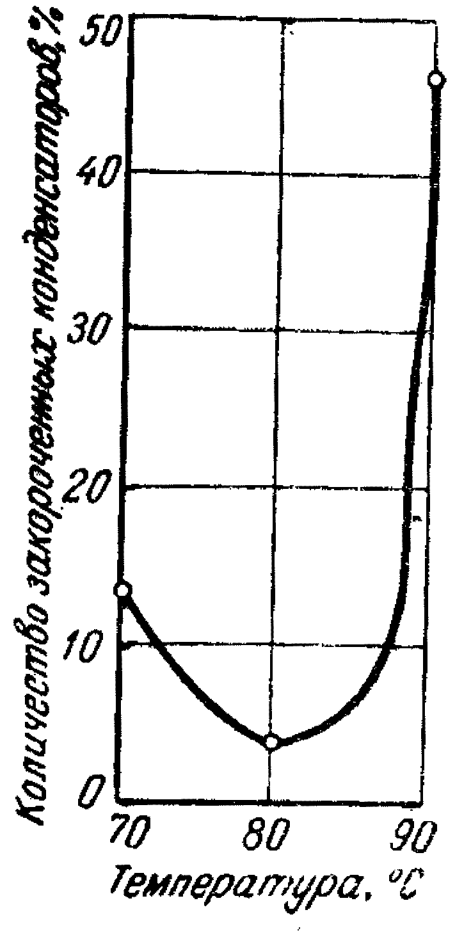


Рис. 53. Качество заготовок КЛГ со сквозными прорезями в зависимости от температуры шликера.

Изменение литейной способности, а, следовательно, и скорости впуска может осуществляться также и за счет изменения давления при литье. Малые и большие значения скорости впуска могут привести к указанным выше дефектам. С изменением температуры формы резко изменяется скорость кристаллизации шликера, а следовательно, и его литейная способность. Низкая температура формы при прочих равных условиях на стадии заполнения ее может привести к недоливам. Повышение температуры формы, а также, следовательно, и пластин пуансонов, как уже отмечалось вызывает прилипание шликера к металлическим пластинам пуансонов, что при распрессовке заготовки (удалении из заготовки пластин пуансонов) может вызвать появление трещин на пластинах заготовки.

На рис. 54 показано влияние температуры формы на качество заготовки. Большое количество короткозамкнутых заготовок при температуре ниже 40° С может быть объяснено наличием недоливов, а при повышенной температуре — прилипанием шликера к пластинам пуансонов. Надо также отметить, что при низкой температуре формы увеличивается наружная усадка шликера в твердом состоянии, что тоже, как показано выше, может приводить к появлению трещин у заготовок

Конструкция литейной формы для литья заготовок конденсаторов, разработанная с учетом вышеизложенных положений, приведена на рис. 55 и 56. Та часть литейной формы, которая оформляет прорези заготовок конденсаторов, представляет собой блок пуансонов, собранный из тонких металлических пластин. В случае оформления заготовок конденсаторов со сквозными прорезями пуансоны расположены вертикально (рис. 55), а конденсаторов с глухими прорезями—горизонтальные (рис. 56). Для извлечения из формы отливки со сквозными прорезями поворотом поддона срезается литник, снимается поддон и обойма и поворотом ручек *6* пластины пуансона выводится из заготовки. Для извлечения из формы отливки с глухими прорезями снимается поддон и поворотом ручек одновременно выводятся из заготовки пластины и выталкиватель выталкивает заготовку из формы.

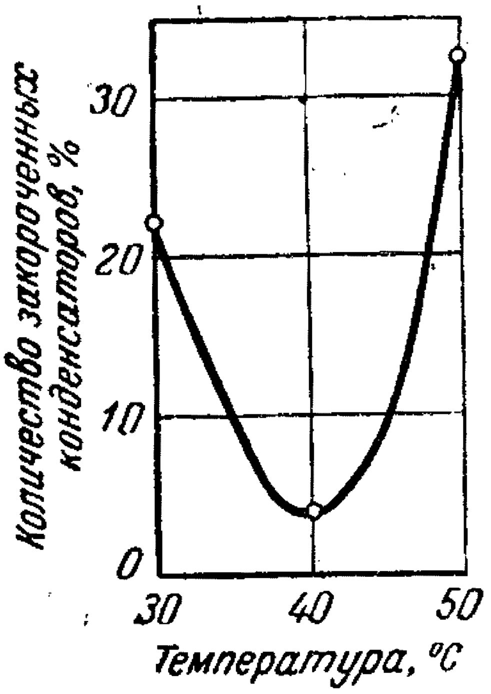


Рис. 54. Качество заготовок КЛГ со сквозными прорезями в зависимости от температуры литейной формы.

Чтобы поддерживать определенную температуру формы, она охлаждается водой, циркулирующей в водяных рубашках. Температура воды устанавливается в зависимости от режима литья. Процесс литья на этих формах осуществляется следующим образом: шликер под дав-

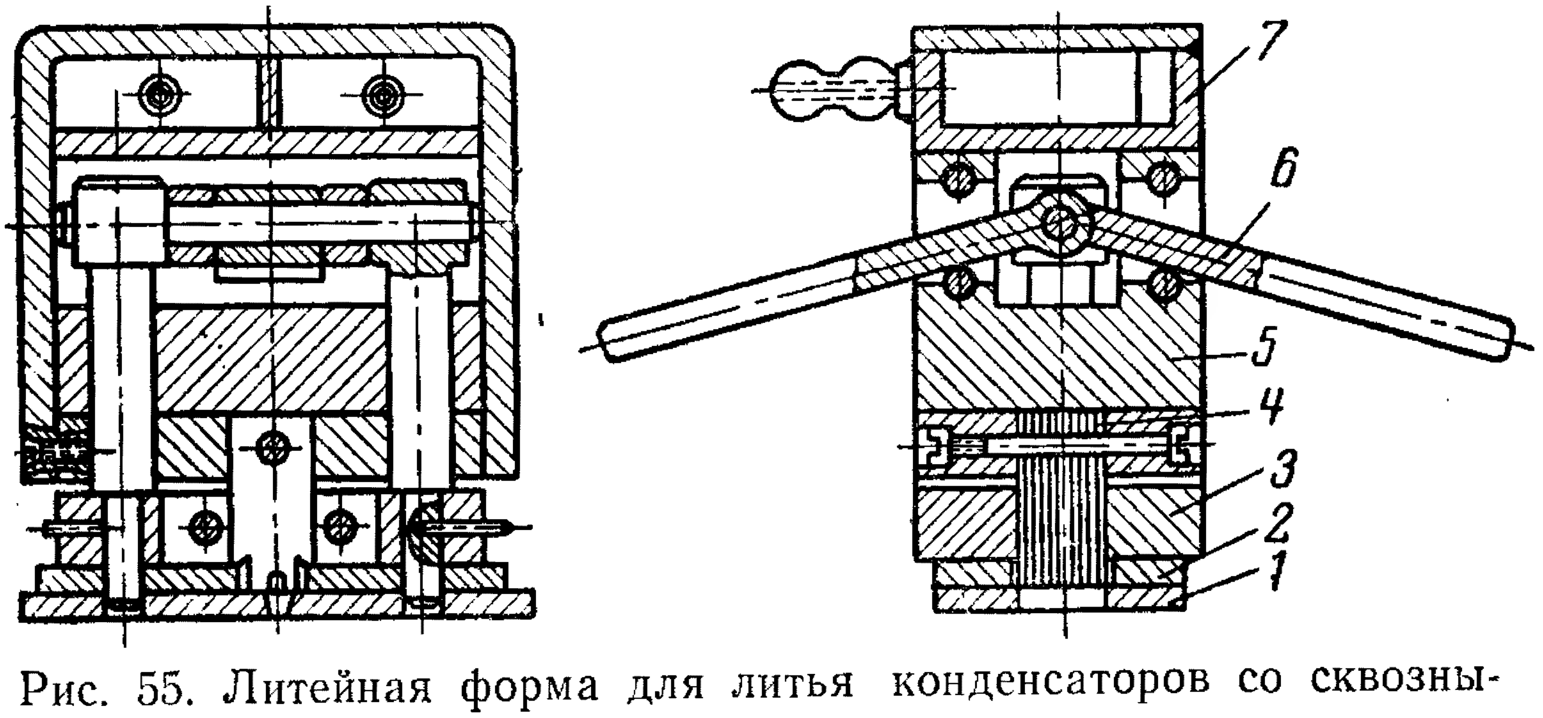


Рис. 55. Литейная форма для литья конденсаторов со сквозными прорезями.

1 — поддон; *2* — обойма; *3* — съемник; *4* — пуансоны; *5* — корпус; *6* — ручка; *7* — водяная рубашка.

лением по питающей трубке литейной машины (см. рис. 35) поступает в литниковое отверстие поддона формы, затем встречает на своем пути торцы пуансонов, огибает их и начинает одновременно двигаться вверх между пластинами пуансонов, оформляя пластинки заготовки

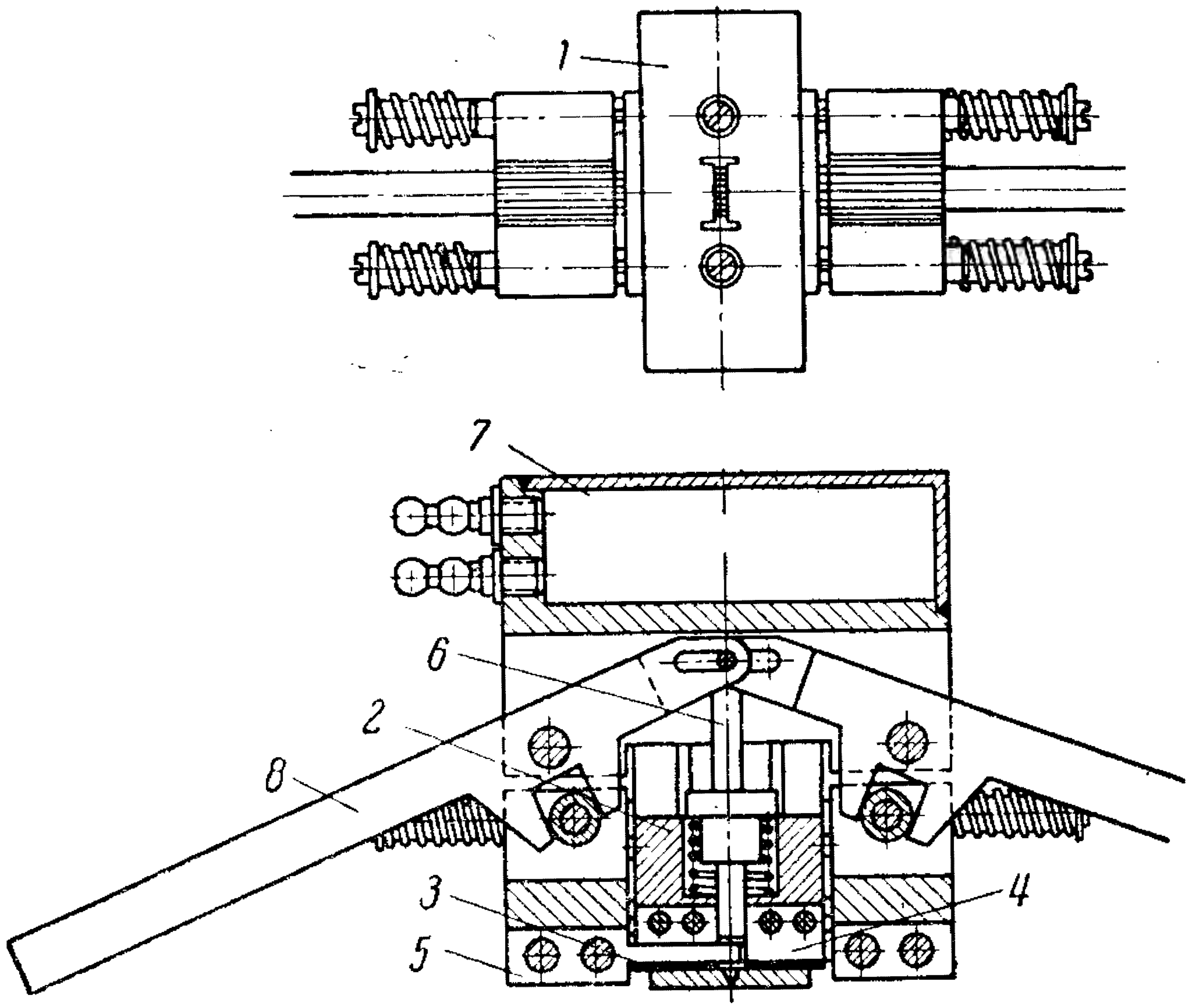


Рис. 56. Литейная форма для литья конденсаторов с глухими прорезями.

1 — поддон; *2* — корпус; *3* — прокладка; *4* — пластины съемника; *5* — пуансоны; *6* — выталкиватель; *7* — водяная камера.

конденсаторов, и в стороны, заполняя ту часть формы, в которой в случае сквозных прорезей оформляется боковая поверхность заготовки конденсатора, а в случае «глухих» прорезей последовательно: нижняя грань, перемычка между пластинами и, наконец, верхняя грань (см. рис. 47). Таким образом, поток шликера (при рассмотрении в плоскости пластины пуансона) делится на три потока—центральный и два боковых (см. рис. 48, 49). Движение шликера сопровождается вытеснением воздуха: сначала из питающей трубки литейного аппарата, затем из полостей формы, заполняемых шликером. Одним из условий слияния потоков шликера является беспрепятственное удаление воздуха из формы. Для выхода воздуха из формы в ней предусмотрены зазоры

между пластинами пуансонов и пластинами выталкивателя (отливки со сквозными прорезями) или зазоры между пуансонами и промежуточными пластинами (отливки с «глухими» прорезями). Кроме того, для беспрепятственного слияния потоков, оформляющих верхнюю грань заготовки с «глухими» прорезями, выталкиватель собран из отдельных пластин с зазорами между ними. Небольшая конусность краев пластин выталкивателя [образуются «зубчики» на верхней стенке отливки (см. рис. 47)] направляет движение потоков, и соединение их происходит под воздушным каналом в месте наименьшего сопротивления выходу воздуха.

Для уменьшения количества проходящего через форму воздуха предусмотрена щелевидная конструкция питающей трубки (с проходным сечением 2,2×14 *мм*), в которой в промежутки между сбросом и подачей давления вязкий шликер не успевает опуститься, и трубка практически все время остается заполненной шликером. Двигаясь в полости формы, шликер охлаждается и отвердевает. Процесс его охлаждения начинается одновременно с поступлением в канал литникового отверстия и продолжается до момента изъятия отливки из формы. Путь, который шликер проходит в полости формы до момента его отвердевания, определяется шириной, высотой и толщиной отливки. При условии малой толщины пластин отливки, ее боковых граней и верхней и нижней плоскостей шликер может отвердевать раньше, чем заполнит форму, образуя так называемый недолив. Экспериментально установлено, что получение отливок без недолива возможно, если ее ширина и высота превышают толщину не более чем в 20 раз.

Слияние потоков шликера при наличии у заготовок со сквозными прорезями ребра жесткости, а у заготовок с глухими прорезями при условии, что толщина перемычки *e* на 10—20% меньше толщины пластин, происходит без образования воздушных включений (см. рис. 49,*д*, *е*). При определенном соотношении размеров отливки скорость движения центрального потока v_{Δ} и двух боковых v_e могут отличаться. Если поток шликера, оформляющий пластины отливки, движется медленней боковых потоков, пластина отливки с некоторого момента начинает офомляться как центральным потоком, движущимся снизу вверх, так и боковыми, которые уже

соединились и начинают двигаться сверху вниз. Если к этому моменту воздух из формы не успел удалиться, на границе слияния потоков образуется воздушное включение (см. рис. 49,*в*). В рассматриваемом случае получение отливки без дефектов связано с необходимостью уравнять скорости движения потоков. Последнее осуществлено соответствующим подбором проходных сечений. Для конденсаторов со сквозными прорезями, где толщина боковых граней из соображений механической прочности значительно превосходила толщину пластин, была увеличена скорость заполнения формы центральным потоком шликера за счет ребра жесткости, которое оформлялось пазом в пуансонах (см. рис. 47,*а*). Для конденсаторов с «глухими» прорезями было уменьшено проходное сечение полости формы, оформляющей перемычки (глухие прорези) между пластинами. Экспериментально установлено, что толщина перемычки *е* должна быть меньше толщины пластин на 10—20%. При этом заполнение форм шликером при оформлении заготовок конденсаторов со сквозными и «глухими» прорезями происходит без образования дефектов (см. рис. 48,*а* и 49,*д*, *е*).

Таким образом, казалось бы, незначительные изменения конструкции конденсаторов позволили существенно повысить их технологичность, т. е. возможность изготовления без дефектов. Качество отливки в такой же степени, как и от ее конструкции, зависит от конструкции и точности изготовления литейной формы. Большое значение с этой точки зрения имеют размеры и конструкция пластин пуансонов. При изменении толщины пластин пуансонов от 0,12 до 0,20 *мм* в случае толщин ниже 0,15 *мм* наблюдался перегрев пластин при соприкосновении с горячим шликером. Адгезионная способность шликера увеличивается по мере возрастания температуры металлических пластин пуансона, и шликер прилипает к пуансонам. На пластинках отливки, расположенных в центральной, наиболее удаленной от охлаждаемой части формы, появлялся след, характерный повышенной пористостью, или даже трещина. При толщине пластин пуансона больше 0,15 *мм* наблюдалось появление в отливке воздушных включений. Расположение воздушных включений носило случайный характер. По-видимому, вследствие гидравлического удара расплава об относительно широкие торцы пуансонов поток расплава раз-

бивается на струи, которые частично движутся вниз, а частично сливаются и проникают в полость формы. При таком движении расплава появляется возможность захвата им воздуха у краев пуансонов и образования воздушных включений в отливке.

С точки зрения уменьшения гидравлического удара целесообразно наличие по плоскости пластин пуансонов конусности (обтекателей). Но в связи с тем, что изготовление конусных пластин пуансонов с необходимой точностью при таких малых размерах оказалось затруднительным, была выбрана прямоугольная форма пластин с толщиной 0,15 *мм*. При оформлении конденсаторов с «глухими» прорезями точность изготовления формы играет решающую роль. В идеальном случае, когда проходные сечения между пластинами пуансонов равны, потоки шликера, движущиеся снизу вверх, достигают верхней грани одновременно. При недостаточно точном изготовлении формы (расстояния между пластинами пуансонов отличаются друг от друга) верхней грани достигают быстрей потоки шликера, движущиеся по широким каналам. Дойдя до верхней грани, такие потоки начинают двигаться сверху вниз, заполняя соседнюю узкую щель (см. рис. 49,*б*). При таком заполнении, как правило, на пластинах заготовки образуются сквозные отверстия. Для нормального заполнения формы, без дефектов, точность изготовления формы должна быть такой, при которой отклонение расстояний между пластинами пуансонов от заданного не превышало бы 2—3%. Последнее достигается селективной сборкой промежуточных пластин и пластин пуансонов.

Как уже упоминалось, увеличение длительности охлаждения отливки в форме (времени выдержки) приводит к увеличению наружной усадки, возникновению больших усилий при распрессовке и возможности появления трещин на пластинах конденсатора. Для уменьшения времени охлаждения отливки за счет сокращения вспомогательного времени (на разборку и сборку формы) было разработано устройство для механического разъема формы (рис. 57). Разъем и смыкание формы осуществляются пневматическим поршнем *1*, шток которого механически связан с помощью траверсы *2* и тяги *3* с ручками формы *4*. Направление движения формы обеспечивается корпусом *5*.

Управление рабочим циклом при литье осуществляется с помощью двух педалей, установленных на литейной машине. Одна педаль осуществляет смыкание и

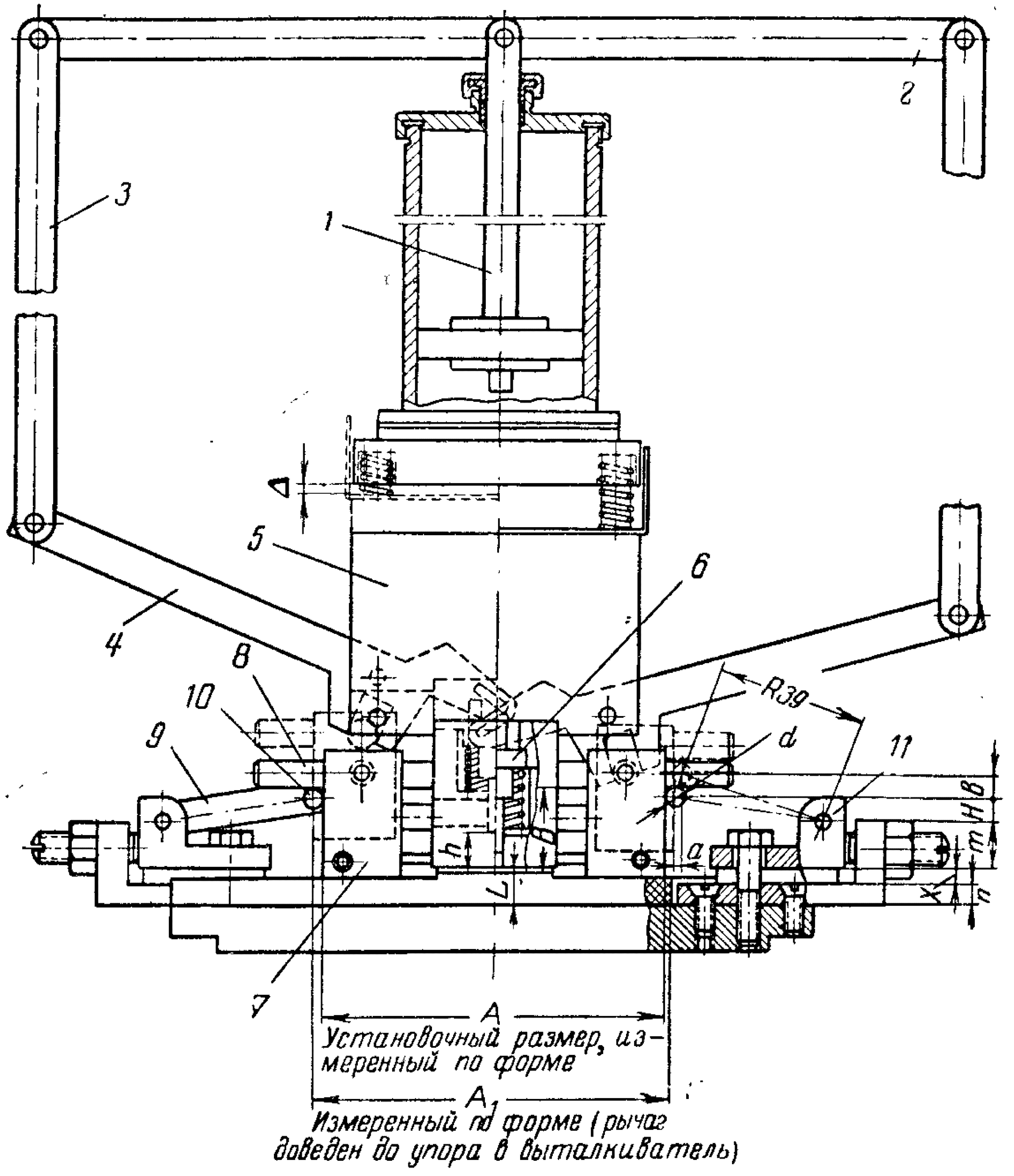


Рис. 57. Устройство для механического разъема формы.

1 — пневматический поршень; *2* — траверса; *3* — тяга; *4* — ручки литейной формы; *5* — корпус; *6* — выталкиватель литейной формы; *7* — блоки пуансонодержателей; *8* — направляющие; *9* — рычаги; *10* — шпильки; *11* — кронштейн.

разъем формы, вторая педаль — подачу давления сжатого воздуха в рабочий бак литейной машины. Использование этого простого устройства обеспечивает возможность литья с темпом 2—3 *сек* на 1 шт. Это позволяет полностью устранить возможность появления трещин на

пластинах заготовки и одновременно существенно повышает производительность труда (600—700 шт. отливок в час).

Для синхронизации движения корпуса формы с движением выталкивателя *6* в устройстве применены поворотные рычаги *9*, позволяющие с помощью шпилек *10*,

a	b	$\frac{d}{2}$	m	n	B	H	L
Измеренный по форме	Измеренный по форме	2,5	11	5	Измеренный по форме с поддон.	Определенный по построению	9,7
$a=\frac{A_1-A}{2}$	b равно ходу выталкивателя	$d=5$ (диаметр оси)	m-размер постоянный	n-размер постоянный	B-размер от края колонки до плоскости текстол. плиты	см. схему	Толщина текстолитовой плиты

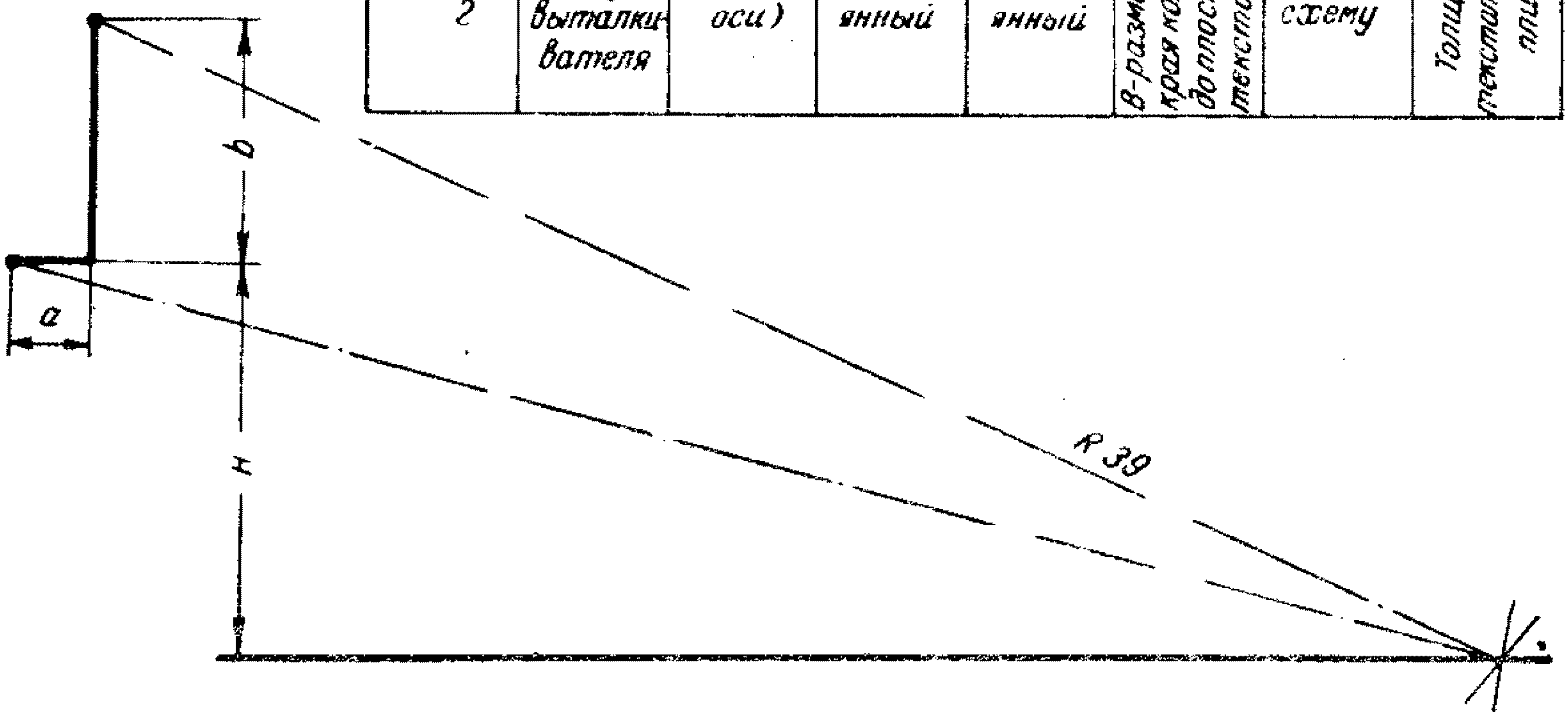


Рис. 58. Графическое определение установочного размера H.

упирающихся в направление *8* и блоки пуансонодержателя *7*, точно регламентировать подъем формы вверх в функции горизонтального перемещения блоков *7*. Закономерность движения формы определяется углом установки рычага *9*. В свою очередь угол установки рычага зависит от размеров формы, литейной машины и приспособления (a, b, d, m, n, B, H, L и x).

В данной конструкции угол установки рычага *9* определяется переменной толщиной подкладки x между кронштейном и плоскостью стола *6* литейной машины. Толщина прокладки x может определяться либо расчетным путем:

$$x=(L+B)-\left(\sqrt{\frac{a^2R^2}{a^2+b^2}-\frac{a^2}{4}}-\frac{b}{2}+\frac{d}{2}+m+n\right),$$

либо графически определяется величина H (рис. 58) с последующим расчетом толщины прокладки:

$$x=(L+B)-\left(H+\frac{d}{2}+m+n\right).$$

9. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термическая обработка деталей, изготовленных методом горячего литья, состоит из двух этапов; удаления технологической связки и спекания [Л. 12]. Эти этапы могут осуществляться раздельно (двухступенчатая термообработка) или непрерывно (одноступенчатая термообработка или однократный обжиг).

В основу двухступенчатой термообработки положено использование порошкообразного адсорбента-засыпки, поддерживающего полуфабрикат при нагревании во взвешенном состоянии и обеспечивающего интенсивное удаление связки с поверхности образца.

В основу процесса однократного обжига положено использование явления структурирования шликеров при охлаждении, применение твердых и комбинированных адсорбентов и специальной методики построения температурного режима, основанной на анализе механизма процесса удаления связки и использования понятий критической температуры и предельного напряжения сдвига.

Механизм процесса удаления связки из полуфабриката и в том и в другом случае состоит из:

1) расширения системы в твердом состоянии при нагревании до температуры плавления (50—60° С);

2) изменения агрегатного состояния и начала миграции связки в жидком состоянии (50—60° С);

3) расширения в жидком состоянии и продолжения процесса миграции связки (60—120° С);

4) перехода технологической связки из жидкого в газообразное состояние (испарение связки) (120—300° С);

5) выгорания остатков связки (300—700° С);

6) начала спекания частиц порошка (300° С и выше).

В зависимости от скорости нарастания температур перечисленные явления могут протекать с различной интенсивностью, последовательно или одновременно в различных элементах объема полуфабриката.

Исследование процесса удаления связки с использованием порошкообразных адсорбентов (засыпки) показало, что интенсивность удаления связки из полуфабриката зависит главным образом от состава и свойства шликера, размеров и конфигурации полуфабриката, температурного режима процесса, состава и свойств адсорбента.

При двухступенчатой термообработке после окончания первого этапа заготовка охлаждается, освобождается от засыпки, устанавливается на огнеприпас, изготовленный из материала, инертного при высокой температуре по отношению к материалу заготовки, и нагревается до температуры, при которой заканчивается процесс спекания частиц твердой фазы. Второй способ термической обработки, получивший название однократного обжига, отличается от изложенного выше тем, что термическая обработка производится непрерывно до окончания процесса спекания частиц твердой фазы. Непрерывность процесса для большинства деталей исключает возможность применения порошкообразного адсорбента (засыпки), так как последний на определенном этапе термообработки препятствует объемным изменениям (усадке) детали, а при высоких температурах реагирует с материалом детали. Поэтому, а также учитывая сложность конструкции отливок КЛГ и, в частности, наличие тонких прорезей, очистка которых от засыпки затруднительна, оказалось необходимым применить однократный обжиг без засыпки.

При однократном обжиге отливки без применения засыпки порошкообразным адсорбентом деформации отливки под действием сил тяжести при нагревании противодействуют только силы внутреннего молекулярного взаимодействия. Так как величина сил, вызывающих деформацию, не зависит от температуры, а предельное напряжение сдвига шликера уменьшается при нагревании, существует температура, при которой деформирующие силы и силы, противодействующие деформации, равны друг другу. Эта температура названа критической ($t_{кр}$). Предельное напряжение сдвига шликера при критической температуре также названо критическим [Л. 10].

Величина критической температуры зависит от свойств шликера, конфигурации и высоты отливки. Для определения значений критической температуры отли-

вок, изготовленных из различных материалов, было разработано специальное устройство (рис. 59). Испытуемые образцы устанавливаются на металлическую плиту и подвергаются нагреванию со скоростью 1° С/*мин*. Темпе-

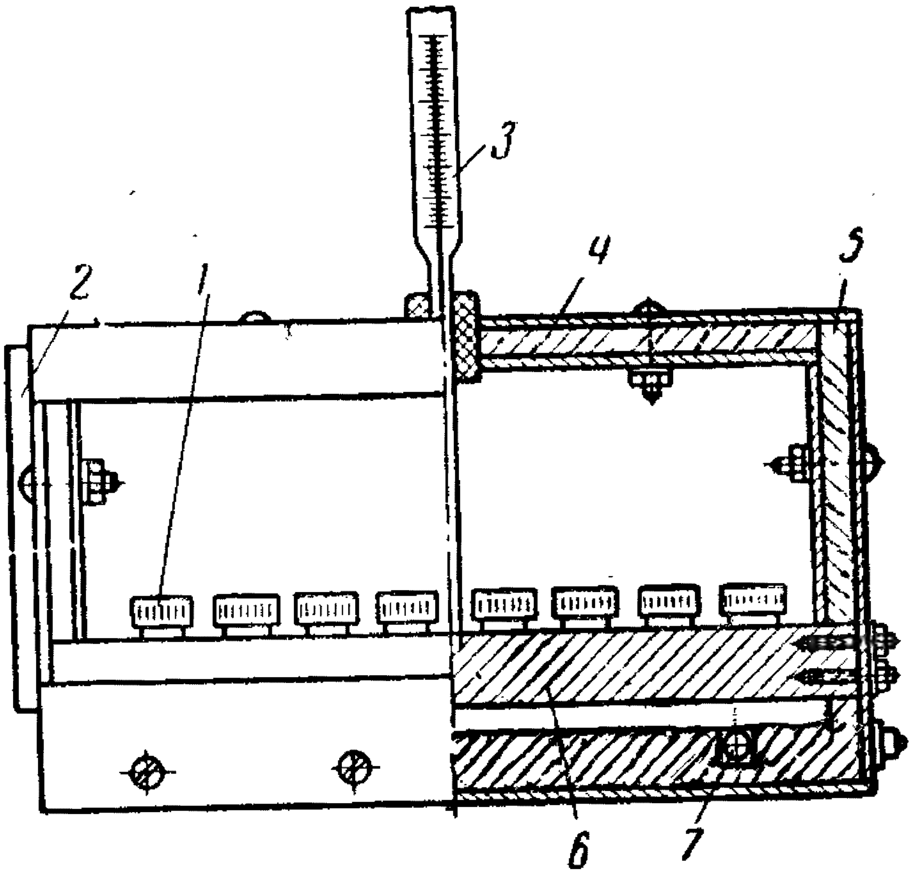


Рис. 59. Устройство для определения критической температуры отливок.

1 — отливка; *2* — стекло; *3* — термометр; *4*—металлический корпус; *5* — теплоизоляция; *6*—металлическая плита; *7* — нагреватель.

ратура начала деформации отливки, которая фиксируется визуально, принимается за критическую. Экспериментально установленные значения критических температур заготовок (отливок) конденсаторов типа КЛГ из различных материалов приведены в табл. 29.

Таблица 29

Температура плавления связки, °С	Температура плавления шликеров, °С	Критическая температура отливок конденсаторов из шликеров, °С					
		ТК-20	ТК-20-80	Т-80	Т-150	Т-900	СМ-1
53—56	54—60	58—60	58—60	58—60	58—60	90	140

Основным условием, позволяющим проведение однократного обжига, является соблюдение такого температурного режима, при котором температура заготовки всегда ниже $t_{кр}$, а предельное напряжение сдвига шликера выше критического. Исходя из этого, первой точкой

температурного режима однократного обжига должна быть температура на 3—5° С ниже $t_{кр}$. Дальнейший ход температурного режима определяется изменением свойств шликера в результате его нагревания. При нагревании до температуры плавления (50—60° С) или

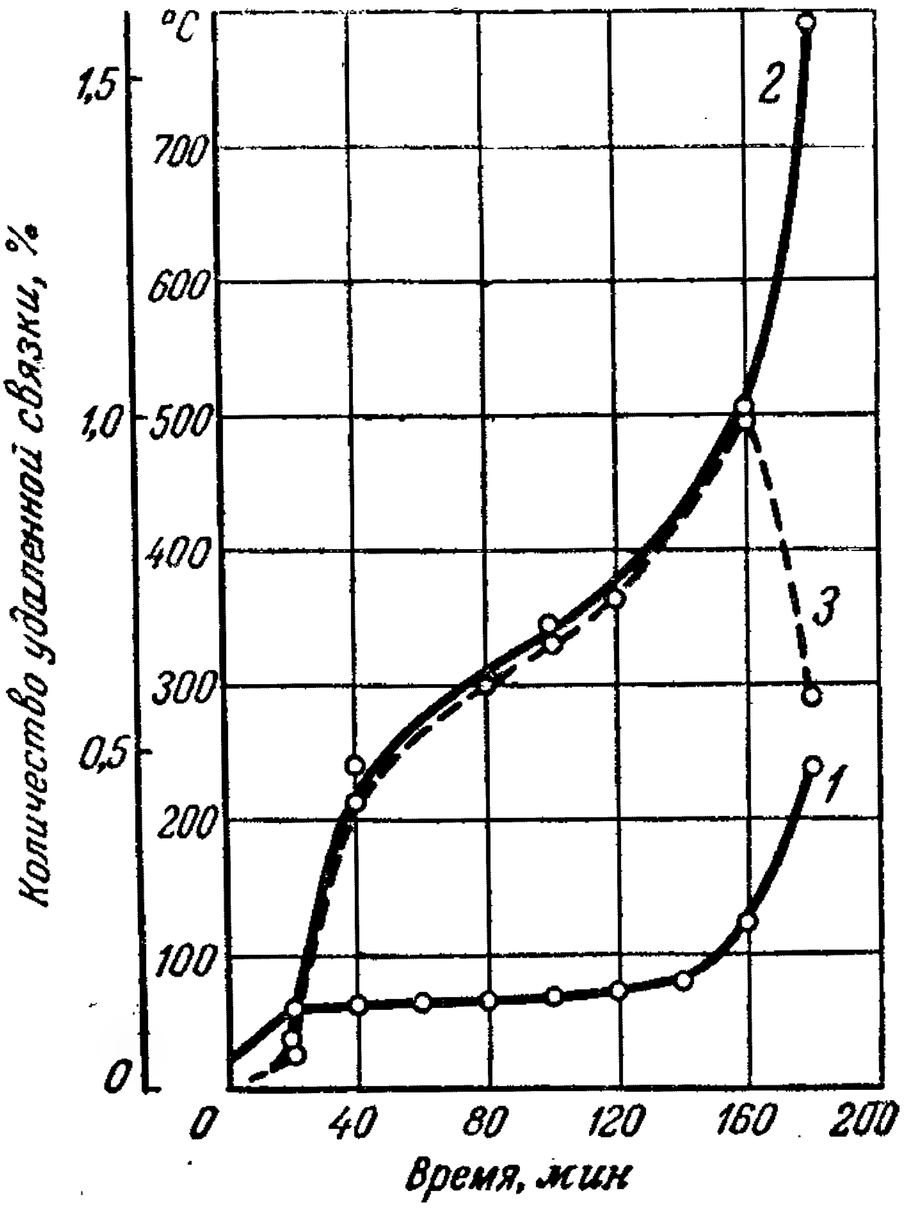


Рис. 60. Удаление связки из отливки.

1 — температура пористой подставки; 2 — количество связки, удаленной из отливки; 3—изменение веса пористой подставки (миграция связки в подставку и испарение связки из подставки).

выше из отливки начинает удаляться технологическая связка. Уменьшение концентрации связки в отливке приводит к увеличению ее структурно-механической прочности. При этом, естественно, повышается $t_{кр}$ и, следовательно, обеспечивается возможность дальнейшего повышения температуры без опасности деформации отливки.

Физическая сущность явлений, протекающих в процессе удаления связки при однократном обжиге, заключается в следующем. Благодаря наличию сил взаимодействия между частицами твердой фазы, полуфабрикат обладает некоторой механической прочностью, завися-

щей от природы частиц порошка и технологической связки, от толщины слоя связки, отделяющей частицы друг от друга, и числа связей (определяемого дисперсностью порошка), приходящихся на единицу площади сечения. Из-за этих связей частицы дисперсной фазы образуют как бы структурный скелет, который при нагревании шликера до определенной температуры ($t<t_{кр}$) сохраняется почти неизменным, а технологическая связка расширяется (объем связки увеличивается при плавлении примерно на 15%, а коэффициент термического расширения равен $(1-3)\cdot 10^{-3}$). В результате этого расширяющаяся при нагревании отливки связка вытесняется из объема на поверхность образца и мигрирует в пористую подставку. Дальнейшее нагревание приводит к испарению технологической связки (рис. 60).

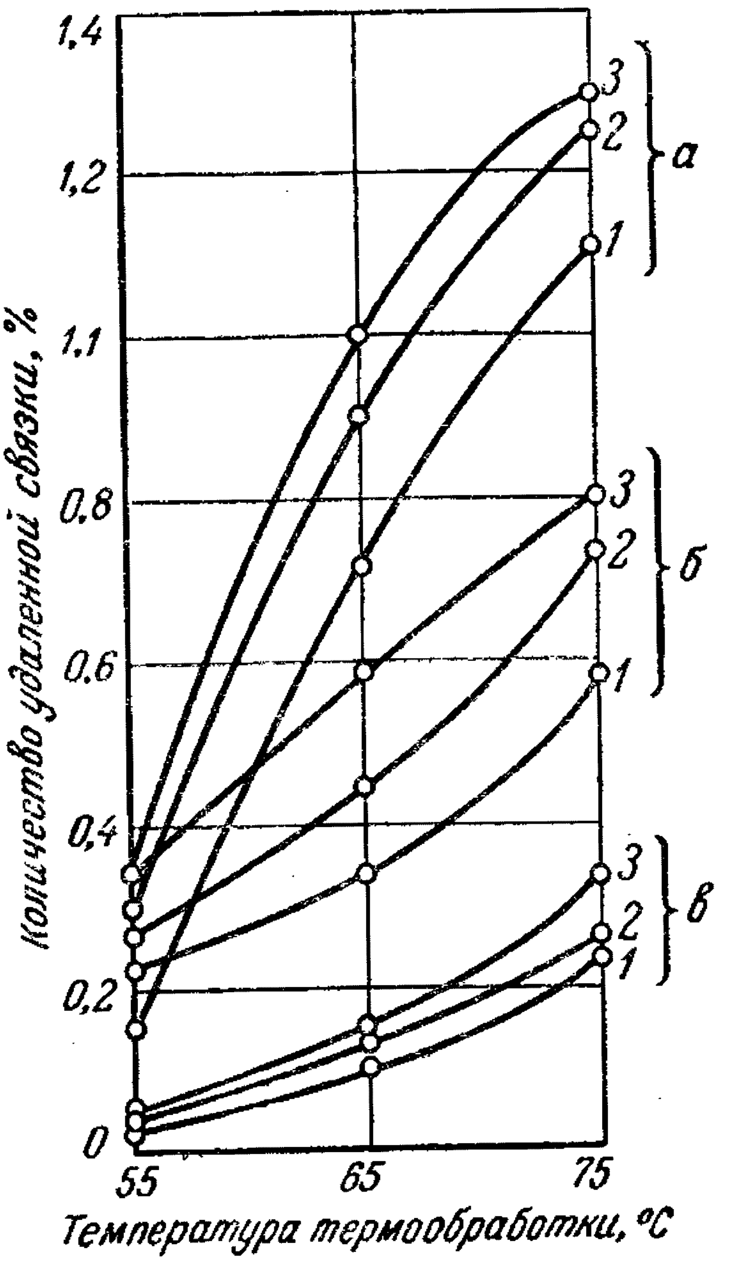


Рис. 61. Количество удаленной связки из отливки в зависимости от температуры термической обработки при различном времени выдержки.

1 — 10 *мин*; *2* — 20 *мин*; *3* — 30 *мин*; *а* — ТК-20; *б* — Т-80; *в* — Т-150.

При однократной термической обработке литого полуфабриката интенсивность удаления связки зависит от направления и режима нагрева, свойств материалов и пористости подставки — адсорбента, размеров отливки и свойств шликера. На рис. 61 показаны изменения концентрации связки в отливках КЛГ в зависимости от температуры и времени термической обработки. Термообработка отливок производилась с применением направленного нагрева [Л. 10] со стороны пористой подставки. Этот способ был разработан применительно к отливкам конденсаторов типа КЛГ с целью увеличения интенсивности отбора связки в месте контакта отливки с пористой подставкой. Механизм процесса удаления связки из отливок при направленном нагреве состоит

в следующем: в первую очередь нагревается нижний слой отливки, соприкасающийся с пористой подставкой. При температуре плавления связки через площадь контакта отливки с подставкой начинается миграция связки в подставку. Отбор связки из нижнего слоя приводит к повышению прочности отливки и, следовательно, к возможности дальнейшего повышения температуры.

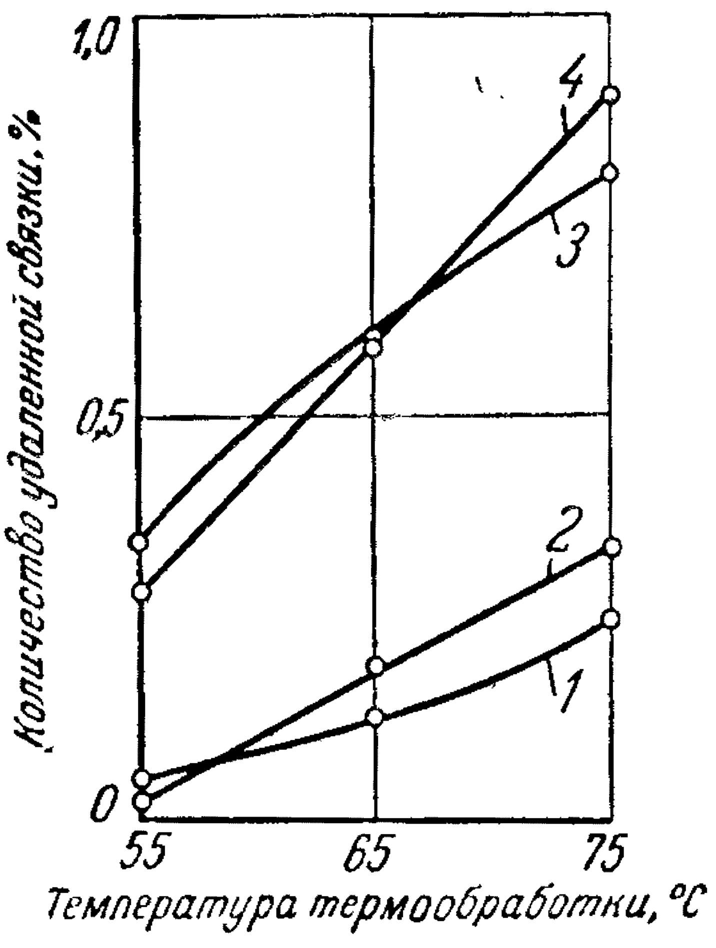


Рис. 62. Количество удаленной связки из отливки в зависимости от температуры.

1, 2 — СМ-1; 3, 4 — ТК-20; 1, 3 — циркониевые подставки с добавкой порошка материала Т-150, пористость 18,5%; 2, 4 — подставки из глинозема, пористость 56%.

Интенсивность процесса удаления связки из отливки в значительной мере зависит от поверхностных свойств материала огнеупорной подставки (адсорбента) и ее пористости. Экспериментальное исследование пористых подставок, изготовленных из различных материалов: окиси алюминия и смеси 75% двуокиси циркония с 25% титаната кальция, показало, что, несмотря на большое различие пористости этих подставок (рис. 62), интенсивность удаления связки из заготовок при термической обработке на этих подставках практически одинакова. Последнее объясняется различием свойств адсорбентов и малым объемом деталей по сравнению с объемом пористых подставок. При этом на глиноземистых подставках (из окиси алюминия) однократную термическую обработку осуществлять нельзя, так как при температурах спекания заготовок КЛГ конденсаторные материалы (ТК-20, Т-80, Т-150, СМ-1 и др.), из которых они изготавливаются, вступают в реакцию с материалом подставки.

По отношению к циркониевой подставке эти конденсаторные материалы относительно инертны даже при температуре спекания. Поэтому термическая обработка заготовок КЛГ при использовании в качестве адсорбента глиноземистой подставки может осуществляться толь-

ко в две стадии: 1) удаление технологической связки из заготовки при нагреве ее на глиноземистой подставке до 400—500° С; 2) спекание на другой огнеупорной подставке (не реагирующей при температурах спекания с материалом заготовки). При этом после окончания первой стадии термообработки производится охлаждение заготовок и их перестановка на другую огнеупорную подставку. Для удаления связки применяется специальная печь направленного нагрева [Л. 10]. Спекание изделий (обжиг) производится в обычных электропечах периодического или непрерывного действия. Температурный режим термической обработки заготовок определяется на первой стадии (до 400—500° С) значением критической температуры отливки и интенсивностью удаления связки, на второй стадии — зависимостью электрофизических параметров конденсатора от температуры спекания, времени выдержки при температуре спекания и скорости охлаждения заготовки.

Термическая обработка заготовок на циркониевых подставках более целесообразна, так как отпадает необходимость перестановки заготовок, и она осуществляется в специально разработанной для этих целей электрической печи [Л. 12].

Из результатов исследования влияния температуры и времени на интенсивность процесса удаления связки (рис. 61) видно, что повышение начальной температуры термической обработки является наиболее эффективным путем ускорения процесса. Повышение начальной температуры нагрева отливки при термической обработке лимитируется величиной критической температуры. Поэтому представилось целесообразным исследовать зависимость критической температуры заготовок КЛГ из различных материалов от некоторых факторов. Исходя из представлений о физической сущности явлений, определяющих структурно-механическую прочность отливки при повышенных температурах, было исследовано влияние фактора времени, температуры, влажности, а также состава шликера (концентрации связки, концентрации ПАВ и дисперсности порошка твердой фазы) на значение критической температуры.

В результате проведенных исследований установлено существенное увеличение критической температуры отливок во времени. Эта закономерность является общей

для отливок, изготовленных из шликеров различного состава (рис. 63). Несколько более интенсивное повышение критической температуры во времени наблюдается при повышенной (50° С) и пониженной (0° С) температурах отливки (рис. 64, кривые *4* и *5*). Наиболее интен-

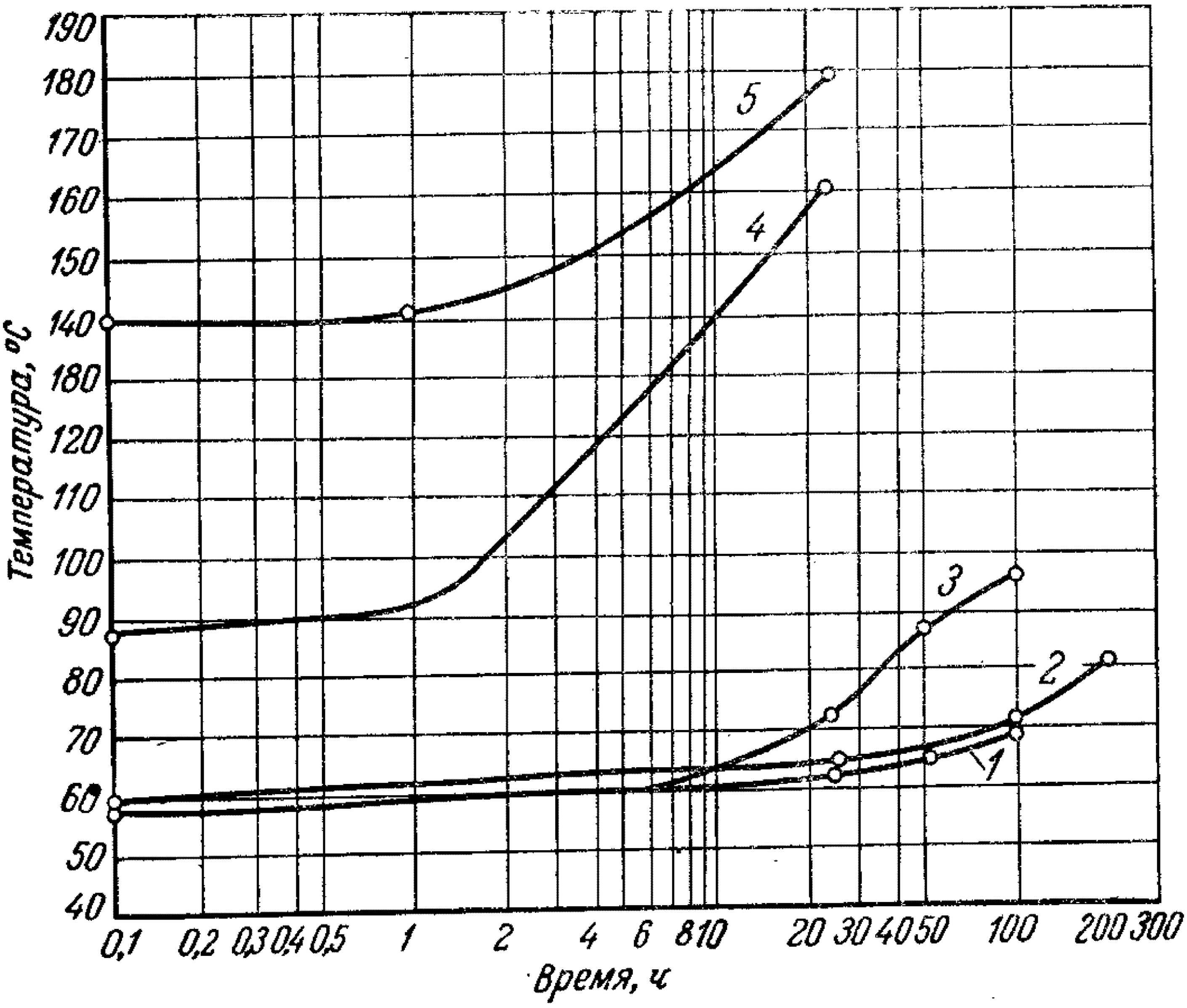


Рис. 63. Критическая температура отливок в зависимости от времени выдержки их в нормальных условиях.
1 — Т-80; *2* — ТК-20; *3* — Т-150; *4* — Т-900; *5* — СМ-1.

сивное повышение критической температуры отливки во времени (рис. 64, кривые *1*—*3*) происходит при повышенной относительной влажности (обработка парами воды) и температуре, близкой к температуре плавления системы (50—60° С). Это явление может быть объяснено диффузией молекул воды в отливку и соответствующим изменением структуры системы, приводящим к резкому повышению ее предельного напряжения сдвига. Указанное находится в соответствии с ранее установленным [Л. 8] фактом резкого изменения свойств шликеров в случае адсорбции на поверхности частиц порошка молекул воды.

Можно также предположить, что во всех рассмотренных случаях физической сущностью повышения кри-

тической температуры отливок во времени является диффузия молекул воды в отливку. При этом в зависимости от температуры и относительной влажности изме-

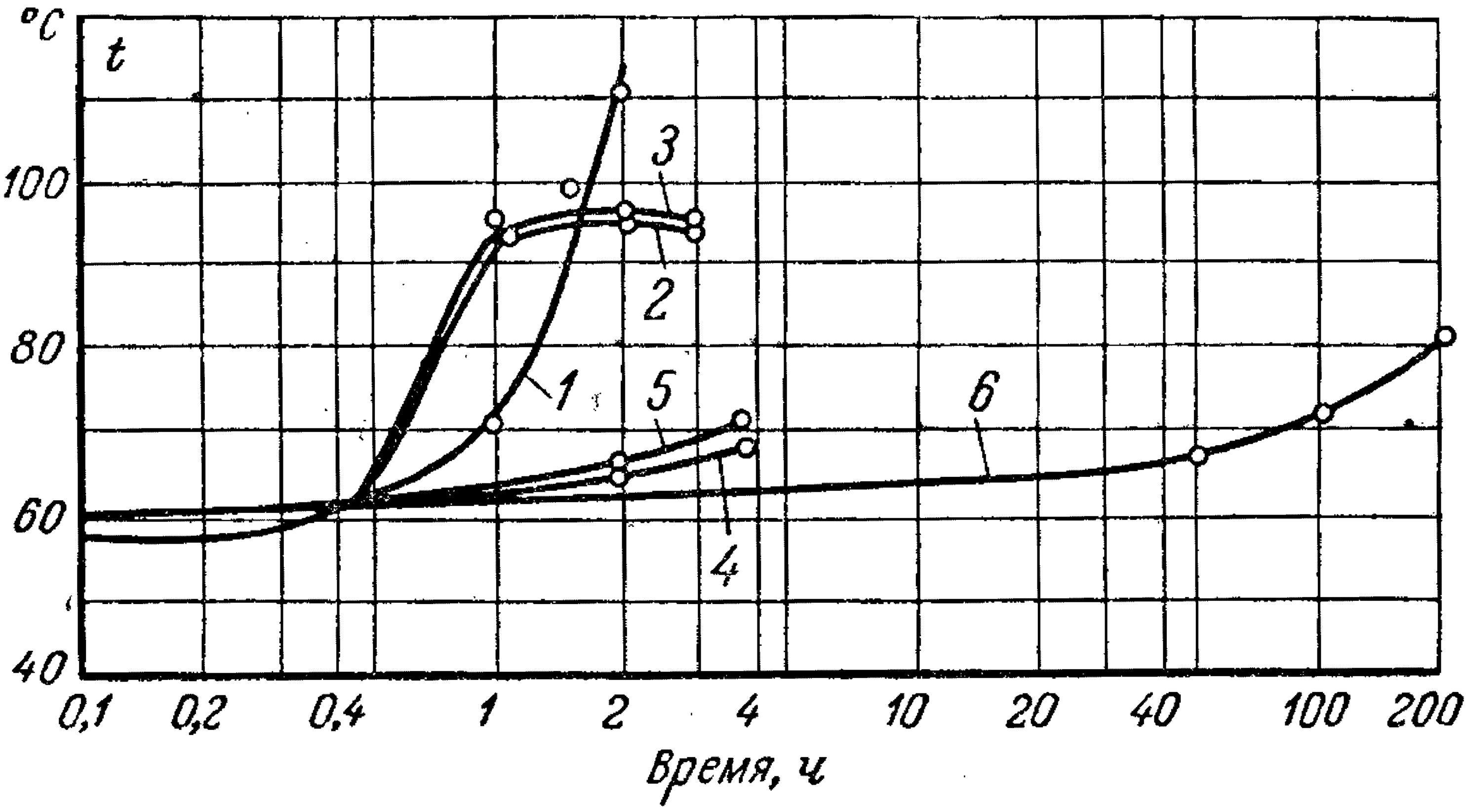


Рис. 64. Критическая температура отливки в зависимости от времени выдержки.

1, 2 и *3* — при относительной влажности 98% и температуре 50° С; *4* — при 0° С; *5* — при 50° С и относительной влажности 70%; *6* — при температуре 20—25° С и относительной влажности 70%. *1* — *1, 4, 5, 6* — ТК-20; *2* — Т-80; *3* — Т-150.

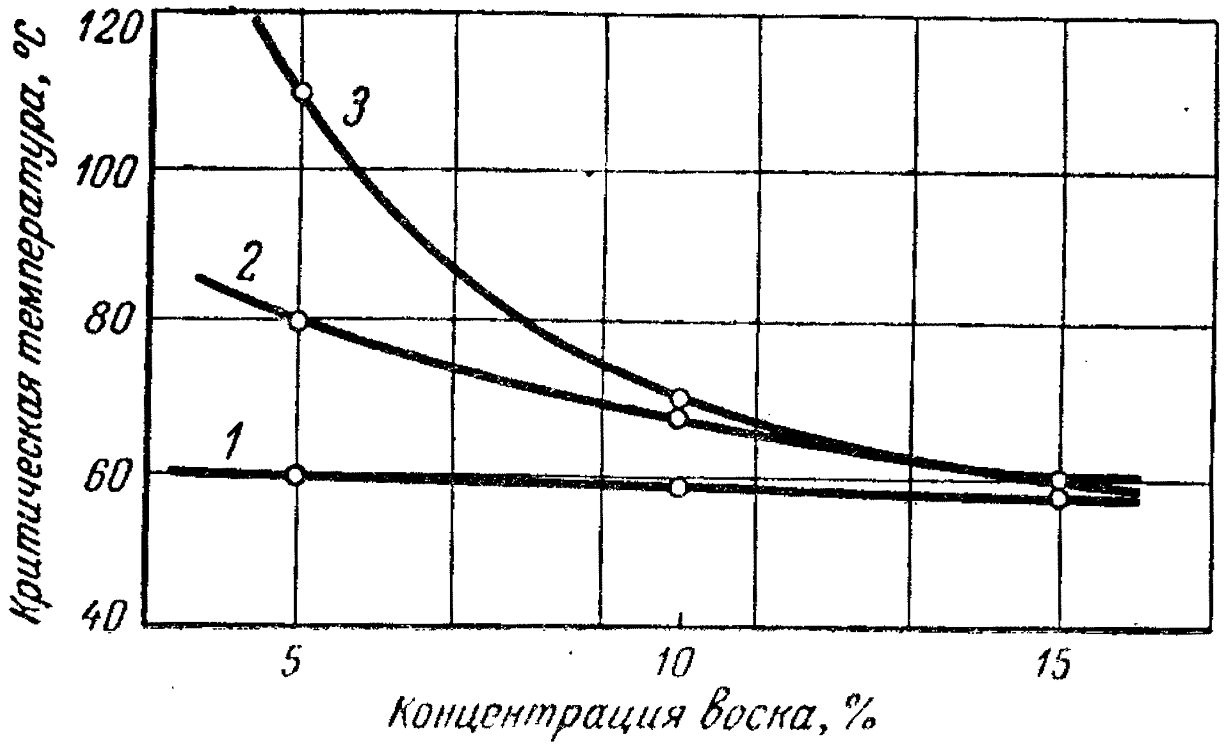


Рис. 65. Критическая температура отливки в зависимости от концентрации ПАВ в связке.

Время выдержки: *1* — 0,5 *ч*; *2* — 24 *ч*; *3* — 48 *ч*.

няется лишь интенсивность процесса. Результаты исследования влияния концентрации ПАВ и технологической связки в шликере и дисперсности порошка показали (рис. 65—67), что уменьшение концентрации связки,

ПАВ и увеличение дисперсности порошка приводят к увеличению критической температуры отливки. Вместе с тем изменение начального значения критической тем-

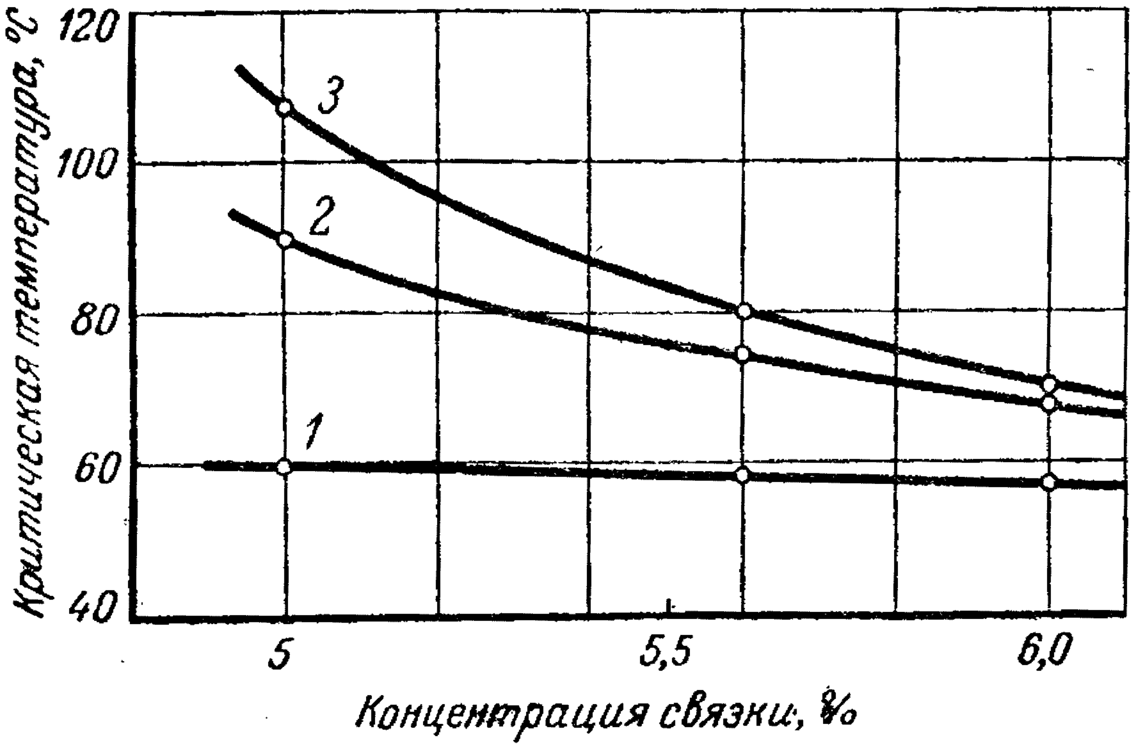


Рис. 66. Критическая температура отливки в зависимости от концентрации связки в отливке.

Время выдержки: 1 — 0,5 ч; 2 — 24 ч; 3 — 48 ч.

пературы отливки (время выдержки после литья 0,5 ч) в зависимости от перечисленных факторов незначительно.

На основе полученных данных оказалось возможным, применив специально разработанную малогабаритную

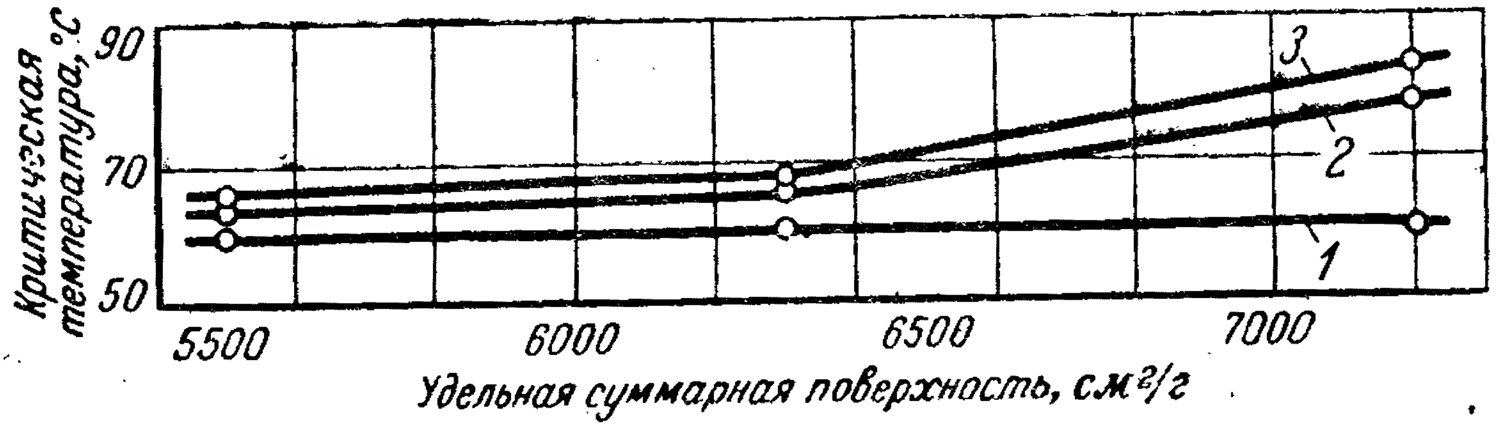


Рис. 67. Критическая температура отливки в зависимости от дисперсности порошка (ТК-20), входящего в состав шликера.

Время выдержки: 1 — 0,5 ч; 2 — 24 ч; 3 — 48 ч.

камеру влаги непрерывного действия (рис. 68), обеспечить существенное повышение критической температуры отливок КЛГ и соответственно возможность резкого увеличения скорости подъема температуры на первой стадии однократной термической обработки. При этом

следует отметить, что скорость подъема температуры на этой стадии лимитируется только возможностью разрушения заготовки при бурном удалении (испарении) связки, которое начинается при 150° С и кончается при 400—500° С.

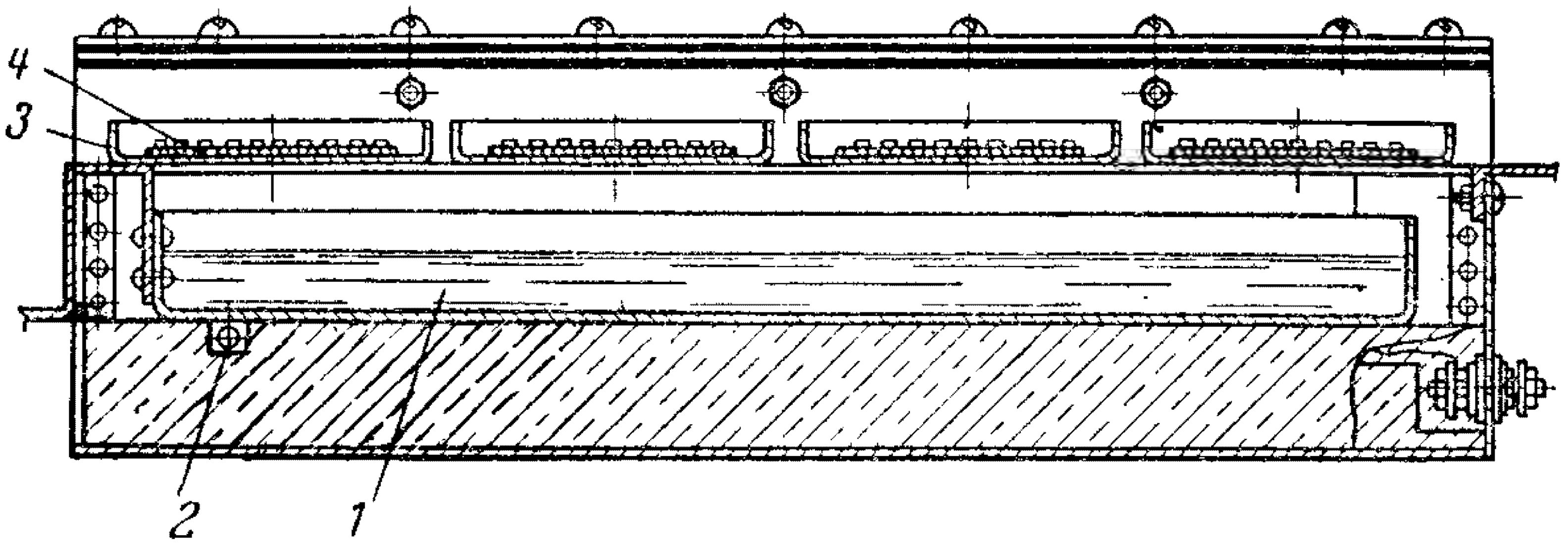


Рис. 68. Камера влаги.

1 — испаритель; *2* — нагреватель; *3* — металлические противни; *4* — огнеупорные подставки с отливками.

Повышение критической температуры отливки КЛГ до 90—110° С легко достигается обработкой отливки, нагретой до 50° С парами воды. Для осуществления этого процесса в камеру влаги (рис. 68) помещаются заготовки, предварительно установленные на пористые циркониевые подставки. В камере отливки обрабатываются парами воды в течение 90—120 *мин*, при этом температура отливки поддерживается равной 50° С. Процесс термической обработки осуществляется в автоматической вертикальной печи (рис. 69). Циркониевые подставки с установленными на них отливками загружаются в специальные капсели (рис. 70), которые устанавливаются в бункер печи *1*. Отсюда капсели с отливками попадают на транспортирующий круг *2*, который передвигает их над кольцевым нагревателем *3* и устанавливает в вертикальный канал печи *4*.

Направленный нагрев отливок до 400° С осуществляется при их передвижении над температурными зонами кольцевого нагревателя. Дальнейший подъем температуры до момента спекания материала и охлаждение обожженных заготовок производятся при их передвижении в канале печи *4*. Нагревателями в этой зоне печи служат силитовые стержни *5*. Нагревание до температуры спекания такой малогабаритной детали, как заго-

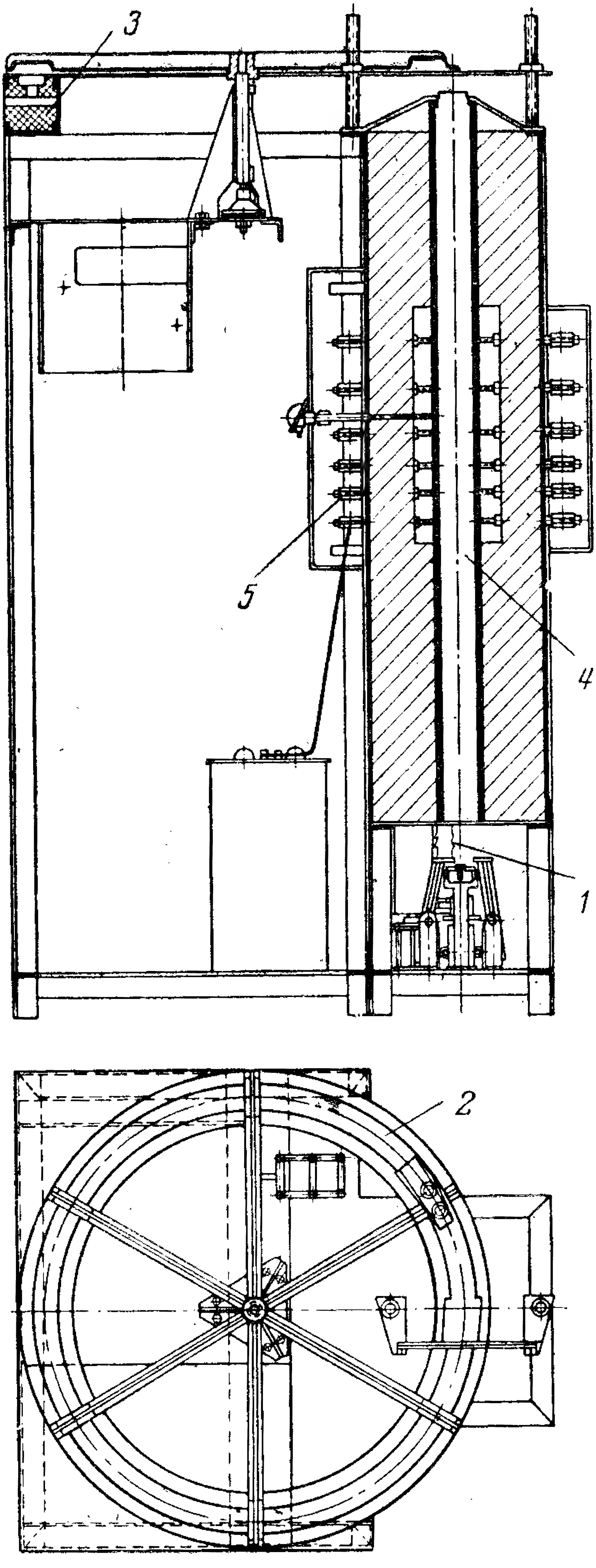


Рис. 69. Вертикальная автоматическая печь для термической обработки отливок.

1 — бункер; 2 — транспортирующий круг; 3 — кольцевой нагреватель; 4 — канал печи; 5 — силикатовые стержни.

товка конденсаторов типа КЛГ, допускается осуществлять со скоростью, которая может быть получена на эксплуатируемом тепловом агрегате. Время выдержки при конечной температуре должно обеспечить соответствие между температурой обжигаемой детали и температурой показывающего измерительного устройства. Решающую роль с точки зрения получения оптимальных электрофизических параметров конденсаторов с керами-

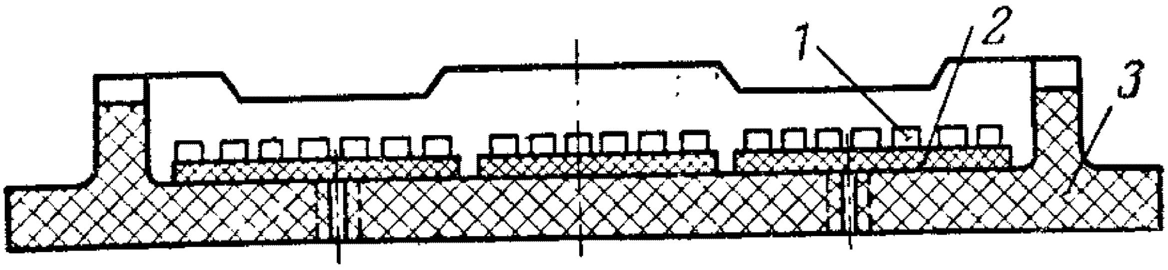


Рис 70. Огнеупорный капсель.

1 — отливки; 2 — подставки из материала, инертного при высоких температурах к материалу отливки; 3 — капсель.

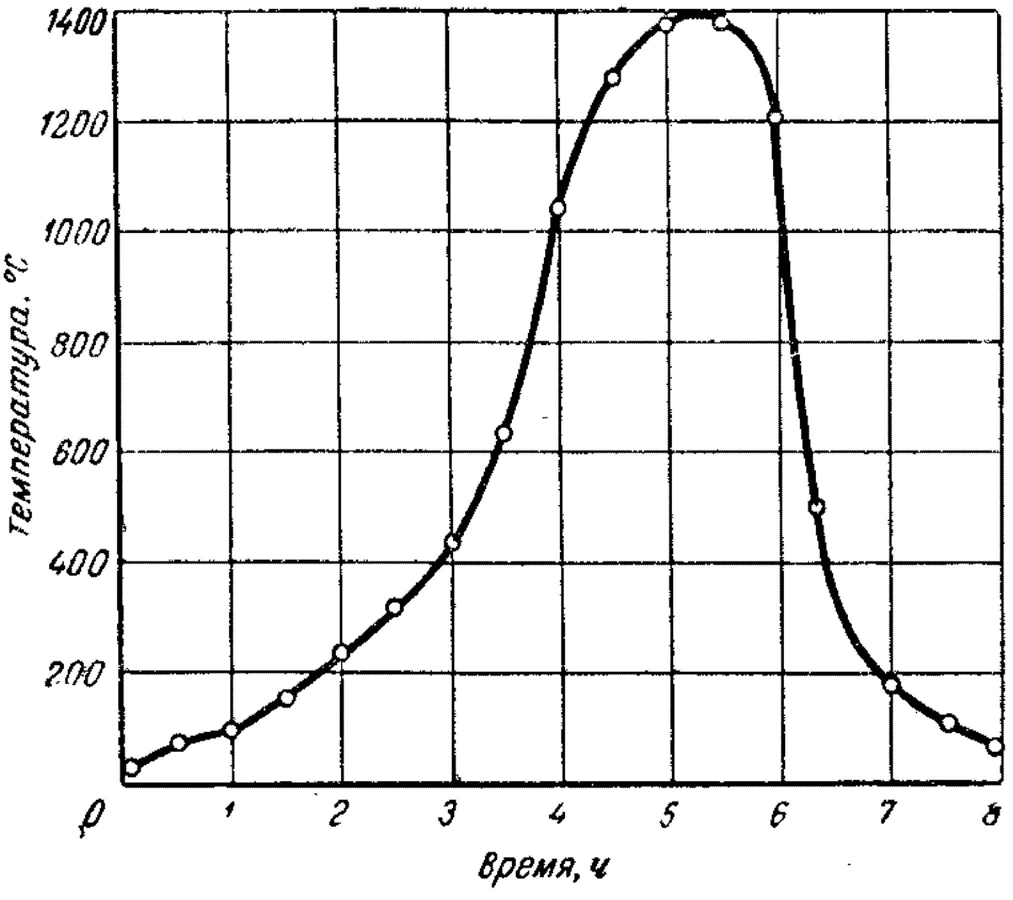


Рис. 71. Режим термической обработки отливок КЛГ применительно к вертикальной автоматической печи.

ческим диэлектриком играют среда, в которой происходит термическая обработка, конечная температура и скорость охлаждения обожженной заготовки. Известно, что обжиг материалов с кристаллической основой $ZrTiO_4$, TiO_2, $CaTiO_3$, $(SrBi)TiO_3$, $(BaTiO_3)_{0,9}$, $(BaZrO_3)_{0,075}$ должен производиться в окислительной

среде. При определении конечной температуры обжига, времени выдержки при этой температуре и скорости охлаждения обожженной заготовки критерием может служить добротность керамического диэлектрика и сопротивление его изоляции, измеренные как в нормальных климатических условиях, так и после увлажнения диэлектрика. Опыт показал, что охлаждение заготовок из конденсаторных материалов ТК-20, ТК-20-80, Т-80 и СМ-1 должно производиться со скоростью 600—800° С/*ч*. Быстрое охлаждение перечисленных диэлектриков приводит к образованию мелкокристаллической структуры, что способствует увеличению их добротности.

На рис. 71 приведен режим термической обработки отливок КЛГ применительно к автоматической вертикальной печи.

10. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ, ШЛИФОВКА И СБОРКА

Способ металлизации и материал электродов в значительной мере определяют механическую прочность контактного узла и такие параметры конденсаторов, как емкость и добротность.

Основными требованиями, предъявляемыми к качеству электродов конденсатора, являются: однородность и плотность металлического слоя, устойчивость против коррозии, влагостойкость и герметичность слоя, температуростойкость, высокая электропроводность, высокая механическая прочность сцепления металлического слоя с материалом диэлектрика.

Для нанесения электродов на заготовку конденсатора типа КЛГ могут применяться способы химической металлизации (например, меднение) и металлизация «вжиганием». Следует отметить, что метод химической металлизации не позволяет получить высокую прочность сцепления металла с керамикой и приемлем для конденсаторов, рассчитанных на рабочую температуру не выше 125° С. Более высокое качество электродов получается при вжигании металлического слоя.

Наиболее широкое применение в промышленности получил способ серебрения керамики вжиганием серебряной пасты. Этот способ использован и для металлизации конденсаторов типа КЛГ. Серебряные электроды, полученные методом вжигания, обеспечивают достаточно

высокую механическую прочность сцепления слоя металла с керамическим диэлектриком, высокую добротность, хорошую устойчивость против коррозии и достаточно высокую температуростойкость.

Недостаточная герметичность серебряного слоя, приводящая к снижению влагостойкости конденсатора, является одним из его основных недостатков. При разработке конденсаторов типа КЛГ герметичность серебряного слоя была несколько улучшена путем введения в состав серебряной пасты № 2 ВТУ 298-56 дополнительно 10% (по весу) стекла № 69.

Критерием прочности сцепления серебряного слоя с керамическим диэлектриком может служить величина резрушающего усилия, приложенного к выводам конденсатора.

Дефекты, образующиеся в процесса металлизации,— не покрытые металлом участки площади электродов — обнаруживаются по отклонению емкости конденсатора от ее расчетного значения. Небольшие участки, не покрытые металлом, не вызывают заметного отклонения емкости, но при увлажнении этих участков добротность конденсатора заметно уменьшается. Это объясняется тем, что силовые линии электрического поля плоского конденсатора замыкаются в данном случае не только через основной диэлектрик, но и через влажный промежуток, добротность которого на несколько порядков ниже добротности диэлектрика. Поэтому о качестве металлизации можно судить также по добротности или по величине обратной добротности — диэлектрическим потерям предварительно увлажненного конденсатора.

Для нанесения слоя серебряной пасты на пластины заготовок конденсаторов ею должны быть заполнены прорези (шириной 0,15 *мм*). Последнее может осуществляться в случае сквозных прорезей как медленным окунанием заготовки в пасту (паста при этом поднимается по прорезям, как по капиллярам), так и окунанием заготовки в пасту после предварительного удаления воздуха из прорезей. Образование серебряного слоя электродов на керамике происходит при нагревании покрытых пастой заготовок до температуры 830° С. Этот процесс сопровождается испарением и выгоранием органики, входящей в состав пасты, восстановлением серебра и плавлением флюса, входящего в состав пасты.

Если термической обработке подвергается толстый слой серебряной пасты, испарение органики из ее нижнего слоя запаздывает и впоследствии вызывает шелушение и вздутие слоя серебра. Поэтому после некоторой выдержки заготовок в пасте, необходимой для заполнения прорезей и смачивания пастой поверхности пластин, паста из прорезей должна удаляться.

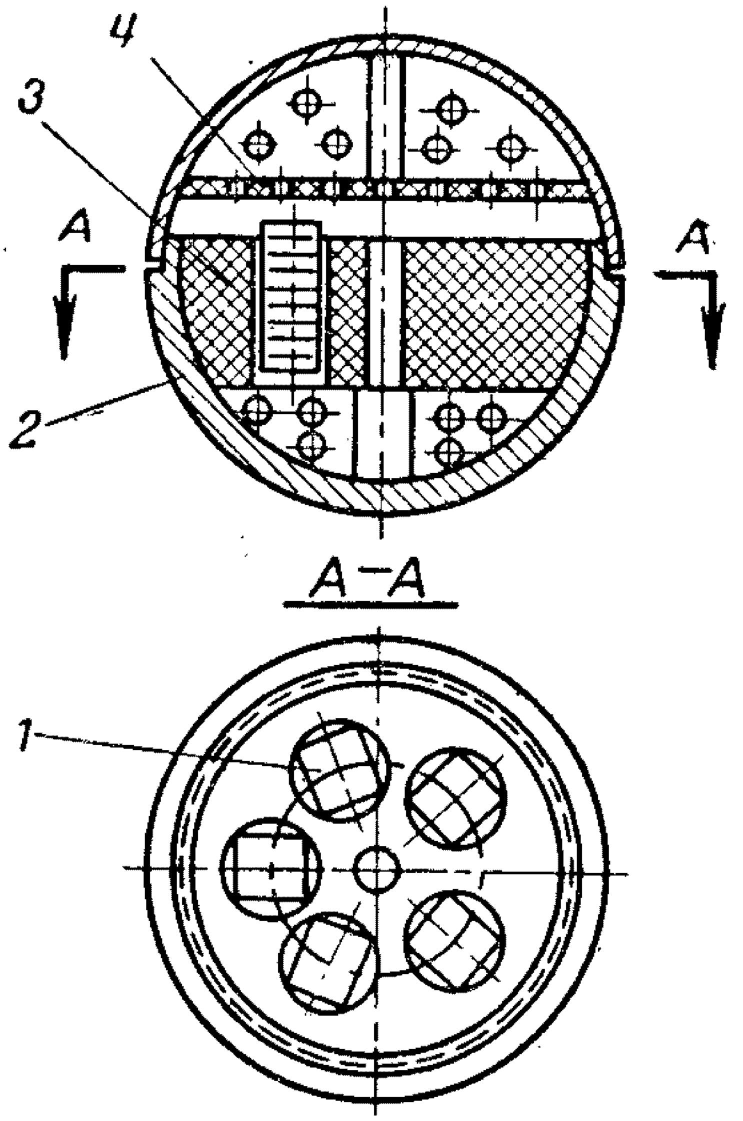


Рис. 72. Приспособление для ориентации заготовок КЛГ с глухими прорезями в процессе их металлизации.

1 — заготовка КЛГ; *2* — перфорированный металлический шар; *3* — перфорированная тефлоновая кассета; *4* — тефлоновая прокладка.

Удаление пасты из сквозных прорезей осуществляется центробежными силами, возникающими при вращении заготовки, пазы которой ориентированы в направлении центробежной силы. Удаление пасты из глухих прорезей усложняется тем, что они открыты во взаимно противоположных направлениях. Поэтому при вращении этих заготовок под действием центробежной силы из части прорезей паста выбрасывается, в другие она нагнетается. Очевидно, для сброса пасты из глухих прорезей вращение заготовок относительно некоторой оси должно совмещаться с изменением положения прорезей относительно направления центробежной силы, т. е. необходимо планетарное движение заготовки. Последнее осуществляется специальным полуавтоматом или следующим сравнительно простым способом.

Заготовки укладываются в ячейки тефлоновой кассеты металлического шара (рис. 72). Шар помещается в загрузочное устройство, с наружной стороны ограниченное перфорированной стенкой. При вращении устройства шар с заготовками, прижимаясь к стенке, вращается вокруг своей оси и из всех прорезей заготовки уда-

ляется паста. Затем вращение шара вокруг своей оси прекращается и из прорезей заготовок, открытых по направлению центробежной силы, возникающей вследствие вращения загрузочного устройства, паста выбрасывается, а в прорези, направленные в противоположную сторону, нагнетается. Сброс пасты из ячеек кассеты и шара осуществляется через имеющиеся на их поверхности отверстия. Для изменения положения шара и его вращения вокруг своей оси, а следовательно, и положения заготовок периодически прекращается вращение загрузочного устройства и изменяется направление его вращения. Тефлоновская кассета предохраняет заготовки от разрушения возникающими при этом ударами о стенку устройства и соударениями шаров.

Для нанесения серебряной пасты на пластины заготовок конденсаторов типа КЛГ применяется специальный полуавтомат (рис. 73). Загрузочное устройство с заготовками помещается в рабочую камеру полуавтомата, в которой при помощи вакуумного насоса создается разрежение (10 *мм рт. ст.*). Затем загрузочное устройство с заготовками погружается в серебряную пасту; вакуумный насос отключается и паста при атмосферном давлении заполняет прорези. После выдержки заготовок в пасте загрузочное устройство поднимается над уровнем пасты и вращается периодически, изменяя направление вращения, что приводит к сбросу пасты из всех прорезей и подсушке заготовок. Сушка и обжиг покрытых пастой заготовок производятся в вертикальной автоматической печи (см. рис. 69).

На рис. 74 приведено распределение температуры над кольцевым нагревателем (участок сушки) и в канале печи (участок вжигания серебра). При определении влияния кратности серебрения на значение емкости конденсатора оказалось, что с увеличением кратности от одного до трех происходит увеличение среднего значения емкости, которое при трехкратном серебрении составляет примерно 98% расчетного.

Экспериментально установлена оптимальная вязкость пасты, для конденсаторов со сквозными прорезями она составляет 45—50 *сек*, а для конденсаторов с глухими прорезями — 30—40 *сек* при истечении 5 *см*^{3} пасты через отверстие диаметром 0,265 *см*. Опыт показал, что время, необходимое для удаления воздуха из прорезей,

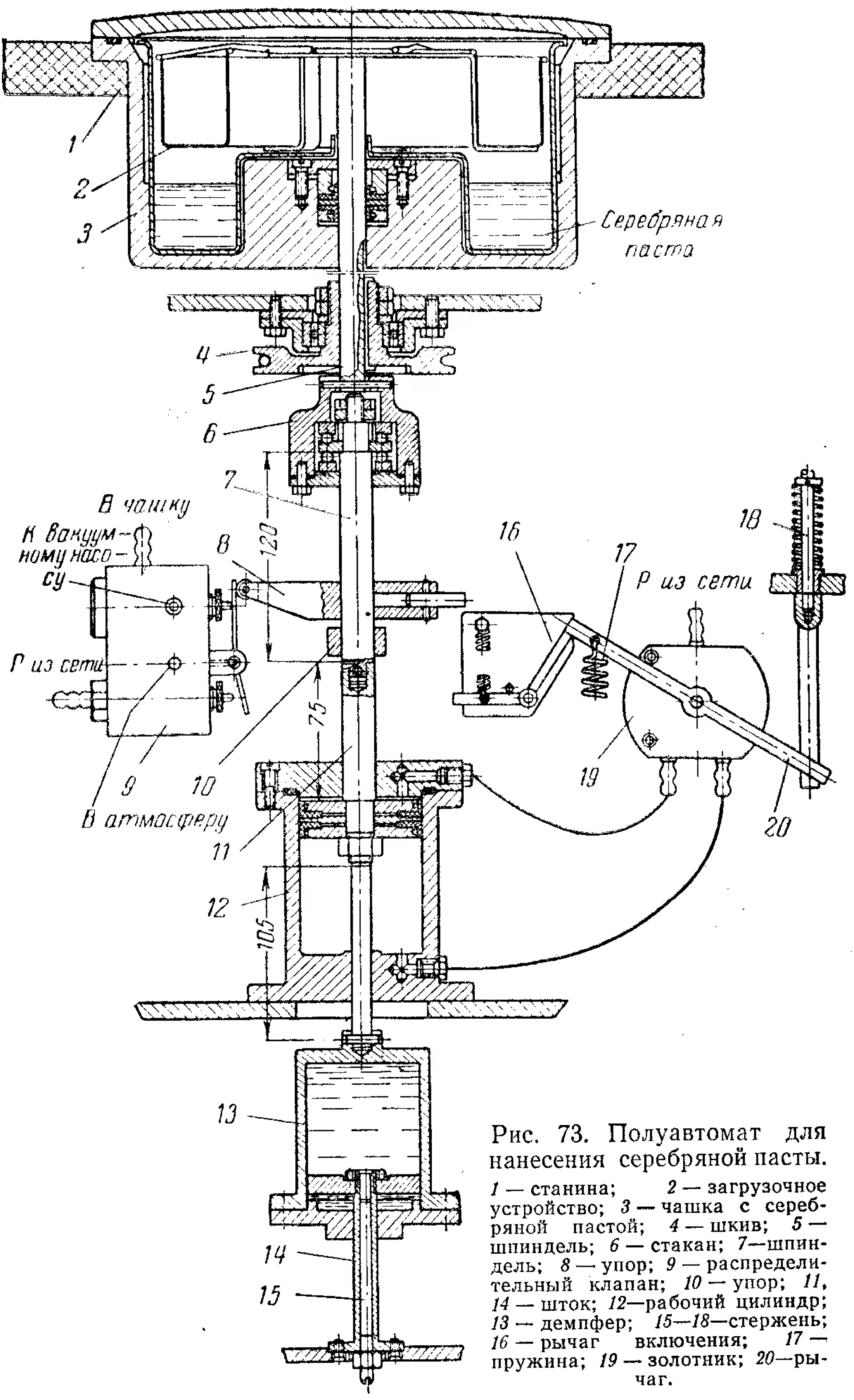


Рис. 73. Полуавтомат для нанесения серебряной пасты.

1 — станина; *2* — загрузочное устройство; *3* — чашка с серебряной пастой; *4* — шкив; *5* — шпиндель; *6* — стакан; *7*—шпиндель; *8* — упор; *9* — распределительный клапан; *10* — упор; *11*, *14* — шток; *12*—рабочий цилиндр; *13* — демпфер; *15*—*18*—стержень; *16* — рычаг включения; *17* — пружина; *19* — золотник; *20*—рычаг.

составляет 15—20 *сек*, выдержка в пасте 20—30 *сек*. Продолжительность сброса пасты (центрифугирования) из прорезей составляет для конденсаторов со сквозными прорезями 10—15 *сек*, а для конденсаторов с глухими прорезями — 25 *сек*. В течение этого времени должно

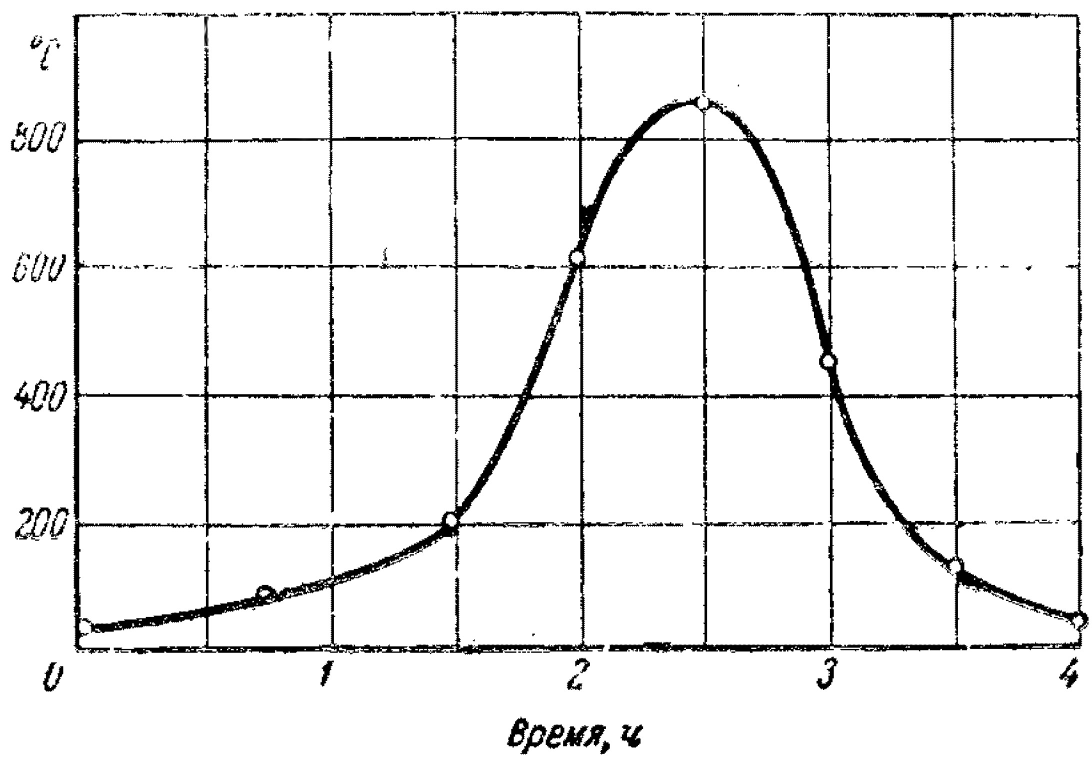


Рис. 74. Режим сушки и вжигания серебра.

производиться не менее четырех остановок и перемен направления вращения загрузочного устройства.

Об эффективности рассмотренного способа серебрения свидетельствуют кривые распределения емкости и добротности конденсаторов после выдержки их как в нормальных условиях, так и во влажной среде (рис. 25).

Шлифовка заготовок конденсаторов типа КЛГ производится для получения необходимой электрической схемы соединения отдельных пластин конденсатора. У конденсаторов со сквозными прорезями шлифовкой осуществляется также получение необходимой номинальной емкости конденсатора. Грани конденсаторов с глухими прорезями после шлифовки подвергаются полировке для уменьшения возможности их загрязнения.

Шлифовка заготовок конденсаторов осуществляется на плоскошлифовальных станках абразивными кругами или на специальных шайбо-шлифовальных станках с помощью абразивного порошка. И в том и в другом случае металлизированные заготовки конденсаторов приклеиваются с помощью канифольного клея (70% канифоли, 30% машинного масла) к плоской шлифован-

ной металлической плитке. Канифольный клей применяется как с целью закрепления заготовок конденсато-

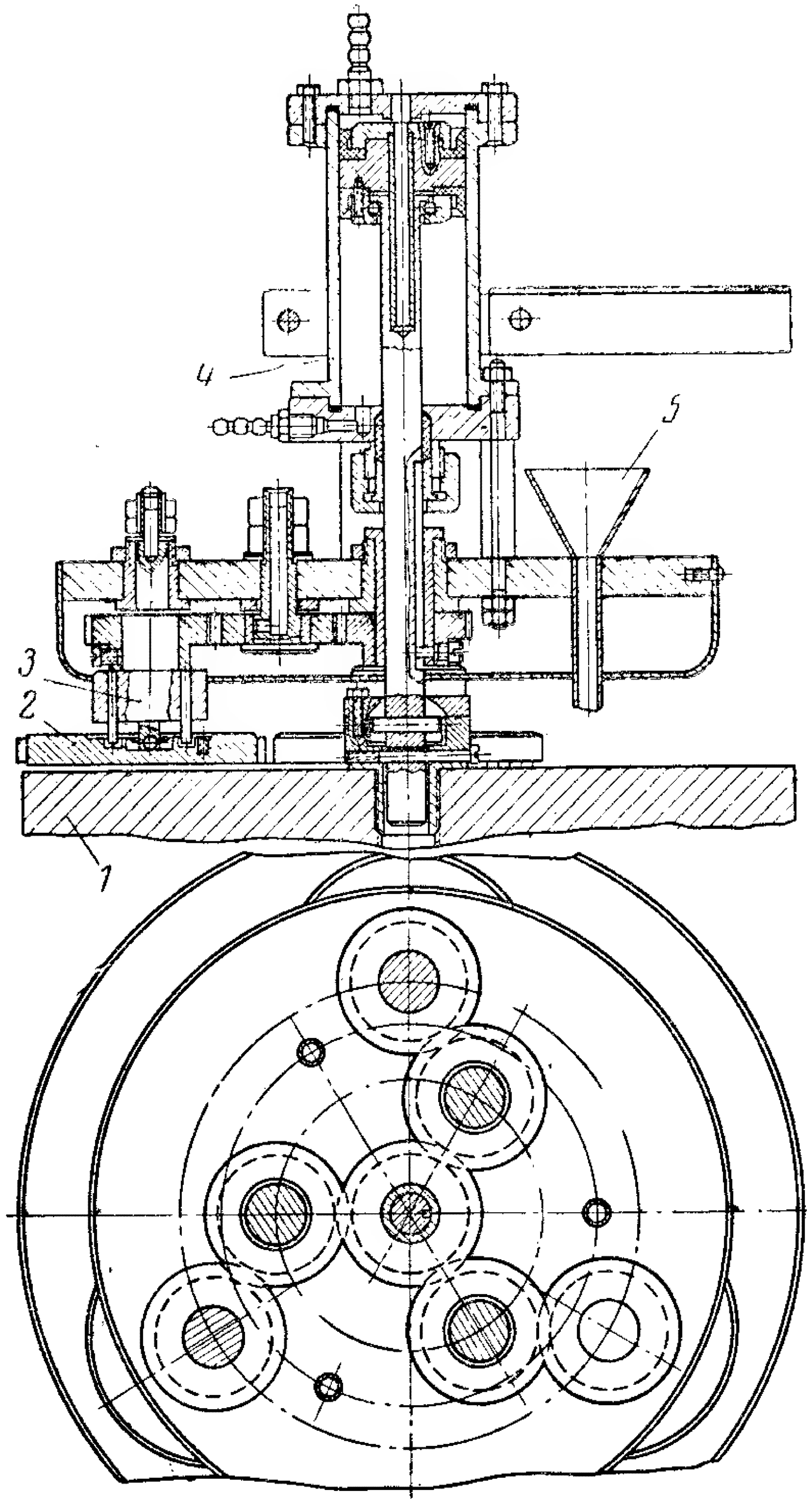


Рис. 75. Станок для шлифовки с пневматической головкой.

1 — шлифовальная шайба; *2* — диск; *3* — шпиндель; *4* — цилиндр; *5* — воронка.

ров, так и с целью предохранения от образования сколов и задиров слоя металла при шлифовке.

При шлифовке заготовок конденсаторов на плоскошлифовальном станке с помощью абразивного круга

увеличивается возможность образования задиров слоя металла и сколов на кромках заготовок. Кроме того, при шлифовке абразивным кругом повышается вероятность образования трещин в заготовке в результате местных перегревов.

Для шлифовки заготовок КЛГ на шайбо-шлифовальном станке используется способ [Л. 11], позволяющий уравнять скорости резания на всех участках шлифуемых изделий. Общий вид станка с пневматической головкой для шлифовки приведен на рис. 75. Процесс шлифовки осуществляется следующим способом: на шлифованные диски (рис. 76) укладываются заготовки конденсаторов, которые затем нагреваются до температуры 150—160° С, и заливаются расплавленным канифольным клеем. Затем диски с заготовками устанавливаются на металлическую плиту, охлаждаемую непрерывно циркулирующей в ней холодной водой, прижимаются грузом и охлаждаются. Приготовленные таким образом диски с наклеенными на них заготовками (одновременно 3 диска, по 75—200 заготовок на каждом) одеваются на шпиндели шлифовальной головки. Затем с помощью пневматического цилиндра диски с заготовками прижимаются к шлиф-шайбе, и включается вращение станка. Через воронки на шлиф-шайбу подается вода и шлифовальный порошок (электрокорунд белый № 320) или заранее приготовленная абразивная суспензия. При шлифовке вращается шлиф-шайба и диски с закрепленными на них заготовками (вращение шайбы и дисков производится в одном направлении с равным числом оборотов). Необходимое усилие прижима дисков к шайбе обеспечивается давлением сжатого воздуха, подаваемого в пневматический цилиндр.

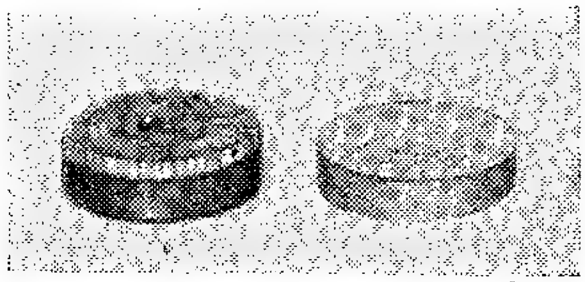


Рис. 76. Диски с наклеенными заготовками.

По окончании шлифовки одной грани заготовок последние подвергаются полировке (для конденсаторов с «глухими» прорезями) непосредственно на дисках с помощью полировального станка (рис. 77) и специальной пасты, состоящей из 70% глинозема технического и 30% стеарина, которые смешиваются при 85—90° С.

Для шлифовки второй (противоположной) грани заготовки диски с наклеенными на них шлифованными заготовками устанавливаются на другие диски (рис. 78) и нагреваются на электроплите до температуры плав-

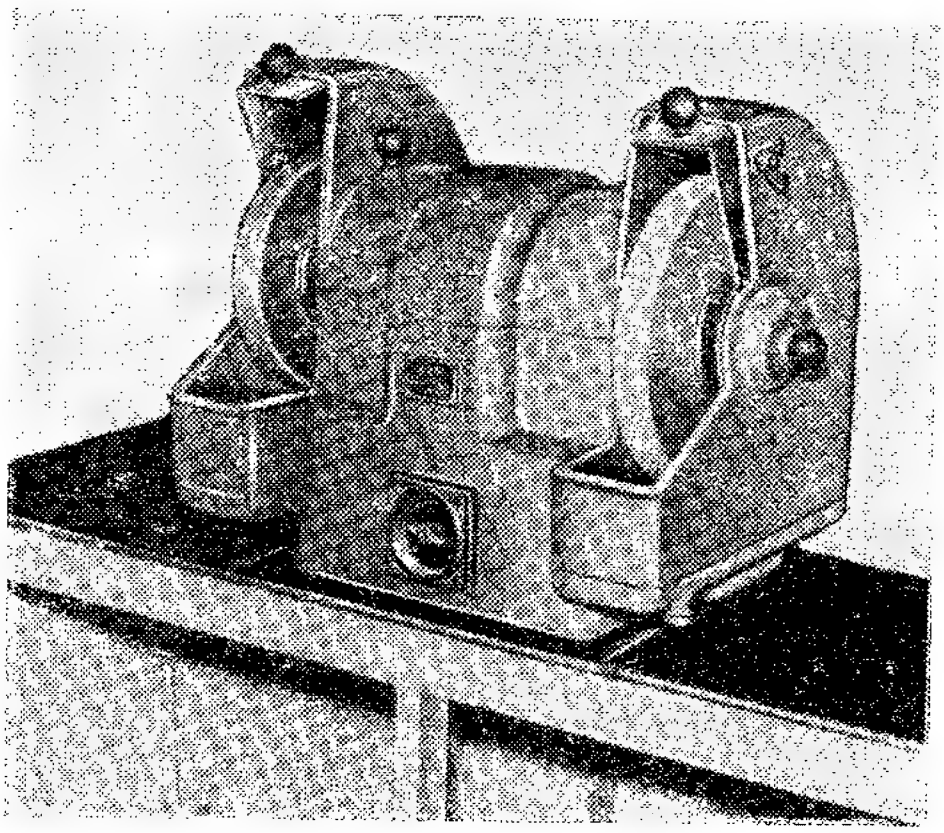


Рис. 77. Полировальный станок.

ления канифольного клея. После этого кольцо *3* сдвигается вниз, на новый диск, а диск *2* сдвигается в сторону и снимается; заготовки с диском устанавливаются на охлаждающую плиту, прижимаются грузом и охлаждаются. Затем производится, как уже описывалось, шли-

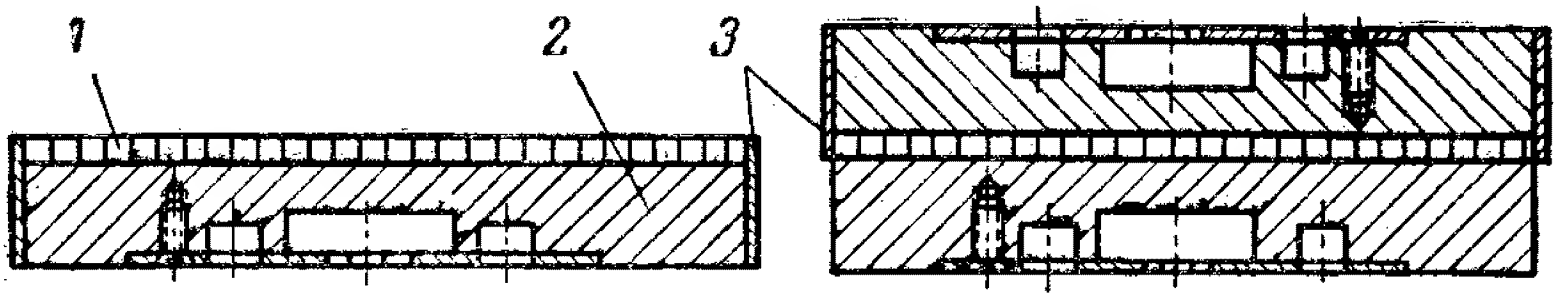


Рис. 78. Переклейка заготовок с одного диска на другой.
1 — заготовки КЛГ; *2* — металлический диск; *3* — металлическое кольцо.

фовка и полировка второй грани. Аналогичным путем шлифуются и остальные грани заготовки.

По окончании шлифовки и полировки заготовки промывают в растворителях (ацетон, бензин) для удаления грязи и абразивного порошка, а затем прокаливают при температуре 750—800° С в малогабаритных вертикальных печах для удаления остатков органики (канифоли

и растворителей). Промытая и прокаленная шлифованная заготовка конденсатора подвергается специальному контролю, описание которого приводится ниже, и поступает на дальнейшие операции технологического процесса, которые условно принято называть сборкой.

Заготовки конденсаторов с «глухими» прорезями в случае необходимости получения конденсаторов с меньшими номинальными значениями емкости, нежели имеет полная заготовка, расчленяются на части тонким металлическим клином (рис. 80). При относительно небольшом осевом давлении на клин возникают значительные тангенциальные усилия, которые легко расчленяют (раскалывают) заготовку на две части. После расчленения одна грань вновь полученных заготовок шлифуется и полируется изложенным выше способом.

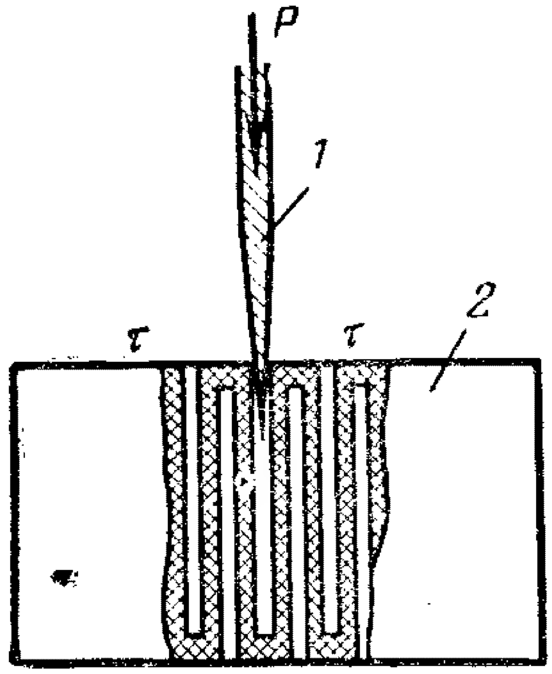


Рис. 79. Расчленение заготовок.

1 — металлический клин; 2— заготовка.

Сборка конденсаторов типа КЛГ состоит из операций: припайки проволочных выводов, нанесения изоляционно-защитного покрытия и цветной кодировки, измерения основных параметров и маркировки номинала емкости, класса точности и года выпуска.

Пайка проволочных выводов осуществляется припоем ПСРО-10-90 [10% (по весу) серебра и 90% олова] с помощью зажимного приспособления (рис. 80) и электрического паяльника.

Для предохранения заготовок конденсаторов от возникновения трещин вследствие термического удара при пайке заготовки перед пайкой подвергаются предварительному разогреву до температуры 180—200° С в тигельной печи. Проволочные выводы изготовляются из медного посеребренного провода диаметром 0,6 *мм* с помощью специального приспособления или путем холодной высадки головки.

Процесс пайки заключается в обслуживании заготовки грани головки проволочного вывода с последующей установкой и припайкой вывода по центру и перпендику-

лярно грани заготовки. После припайки одного вывода заготовка поворачивается в приспособлении на 180° и производится припайка второго вывода. В качестве флюса при пайке используется канифоль.

Нанесение органических изоляционно-защитных покрытий осуществляется после припайки к конденсаторам

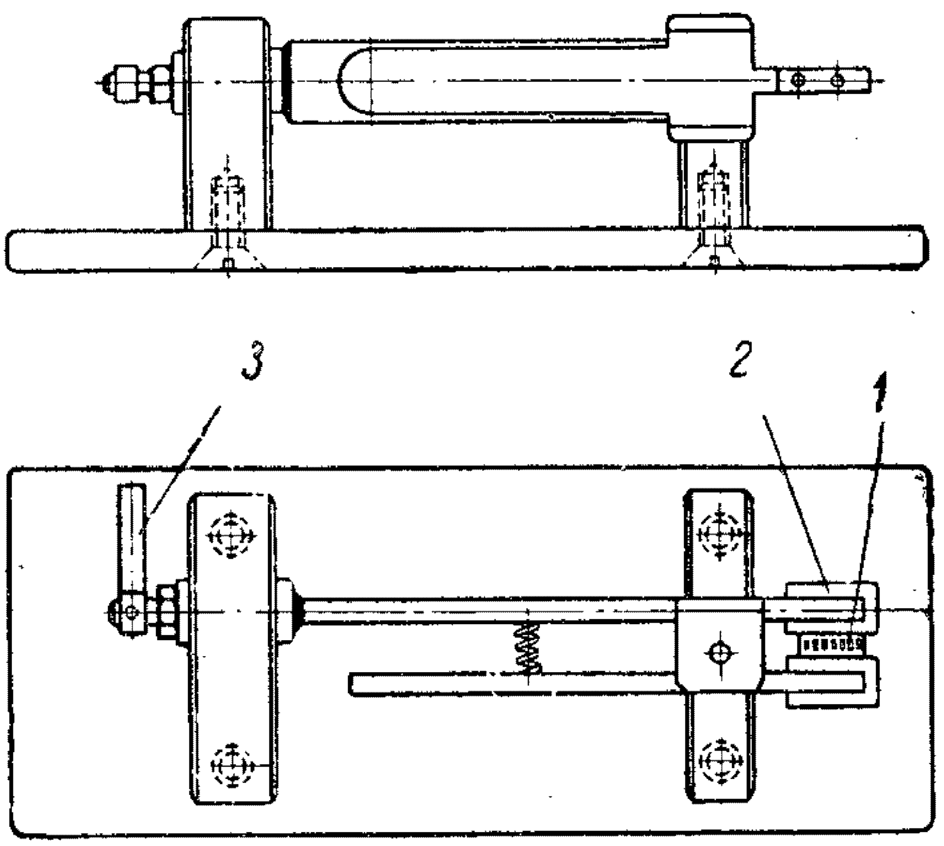


Рис. 80. Приспособление для припайки выводов.

1 — заготовка, КЛГ; *2* — прижим; *3* — поворотный рычаг.

выводов. Неорганическое изоляционно-защитное покрытие (стекло) наносится на конденсаторы до операций припайки выводов.

Органические эмали и компаунды наносятся на поверхность конденсатора (у конденсаторов с «глухими» прорезями только на грани с контактными узлами) с помощью кисти вручную или на специальных полуавтоматах. После нанесения первого тонкого слоя эмали (компаунда) конденсаторы сушатся в сушилках периодического или непрерывного действия. Температура и режим сушки зависят от состава и свойства применяемого органического материала. Для эмалей ЭКР температура сушки 160° С с выдержкой в течение 2—3 *ч*. Обычно покрытие наносится дважды и после нанесения каждого слоя подвергается сушке. Органические изоляционно-защитные покрытия применяют различных цветов, и они, кроме своих основных функций, выполняют

роль цветной кодировки конденсаторов по группе ТКЕ. Отличительные цвета кодировки конденсаторов по группам ТКЕ приведены в табл. 30.

Таблица 30

М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Голубой	Голубой + красный	Красный	Зеленый	Зеленый + оранжевый	Оранжевый

Неорганические изоляционно-защитные покрытия (стекла) наносятся на поверхность конденсаторов следующим способом. Из порошка соответствующего стекла (№ 69, 74 и пр.) приготовляется шликер обычным в технологии горячего литья методом [Л. 10], состоящий по весу из 85—90% стекла и 10—15% технологической связки (состава 94% парафина и 6% воска). Шликер из стекольного порошка может наноситься на поверхность заготовки двумя способами: окунанием заготовки в расплавленный шликер с помощью специального устройства или литьем под давлением в специальных формах. Первый способ заключается в следующем: заготовка закрепляется в зажимах (рис. 81), расположенных на диске устройства, диск устанавливается на шпиндель устройства, камера устройства закрывается, и в ней создается вакуум (остаточное давление 10—20 *мм рт. ст.*), заготовки погружаются в расплавленный шликер, а затем в камеру подается атмосферное давление. После выдержки заготовок в шликере в течение времени, достаточного для заполнения прорезей конденсатора, диск с заготовками поднимается вверх (выше уровня расплава шликера) и ему сообщается вращательное движение, обеспечивающее сброс избытков расплава с поверхности заготовок центробежными силами, а также

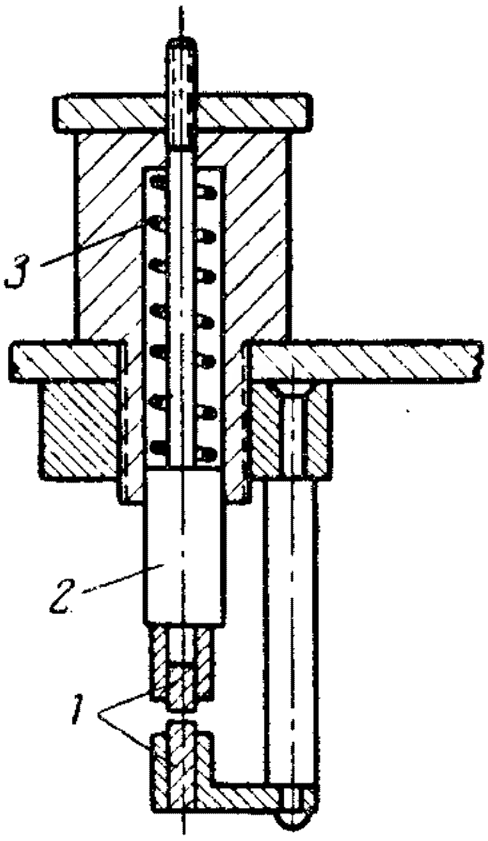


Рис. 81. Зажим для крепления заготовок в процессе остекловывания.

1 — пробка резиновая; 2 — шток; 3 — пружина.

охлаждение и отвердевание шликера. Затем диск вынимается из устройства, и заготовки извлекаются из зажимов. Следует отметить, что принцип действия и конструкция устройства для нанесенеия стеклянного покрытия на заготовку конденсатора описанным методом

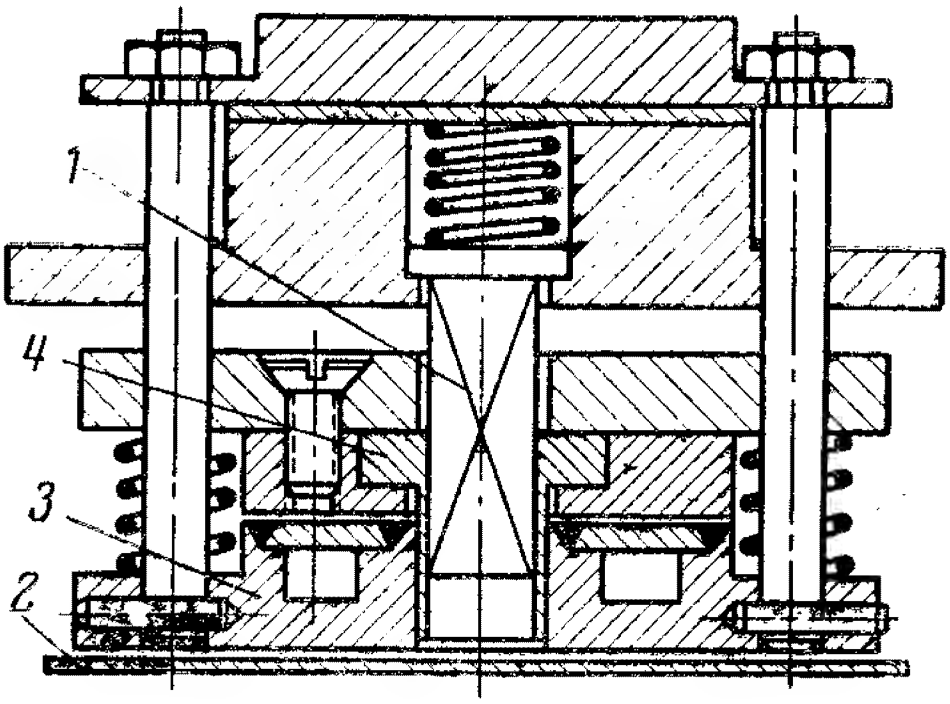


Рис. 82. Форма для остекловывания.
1 — выталкиватель; 2 — поддон; 3 — корпус; 4 — фиксатор.

аналогичны устройству для покрытия серебряной пастой (рис. 73).

Второй способ осуществляется с помощью литейной формы, конструкция которой приведена на рис. 82, и литейной машины типа ЛПГ-1Л (рис. 35). Заготовка конденсатора устанавливается в гнездо формы, где две ее противоположные грани зажимаются выталкивателем и поддоном. При установке на стол литейной машины после прижатия формы к столу ограничительные собачки отходят в сторону и фиксатор под давлением пружины поднимается вверх, освобождая полость для заполнения шликером. После заполнения формы шликером и его охлаждения форма снимается со стола литейной машины и из нее выталкивается заготовка, покрытая слоем шликера.

Покрытые слоем шликера заготовки конденсаторов подвергаются затем термической обработке для удаления технологической связки и оплавления слоя стекла. Термическая обработка может производиться в электропечах периодического и непрерывного действия, но наиболее эффективно применение вертикальных печей непрерывного действия [Л. 10, 12]. Нагревание произво-

дится до температуры оплавления стекла (750—800° С).

После получения слоя стекла заготовки поступают на операцию припайки проволочных выводов, а затем цветной кодировки, наносимой на грани и контактные узлы.

Заготовки конденсаторов типа КЛГ с припаянными выводами после кодировки подвергаются соответствующим испытаниям для отсортировки дефектных образцов и определения номинальных значений емкости и класса точности по емкости.

Затем на гранях конденсатора с помощью специальной машины или полуавтомата наносится маркировка номинального значения емкости в пикофарадах, класса точности и года выпуска. После маркировки конденсаторы подвергаются сушке при температуре 160° С.

Готовые конденсаторы подвергаются контрольным и выборочным типовым испытаниям для определения их соответствия требованиям технических условий. Методика испытаний, применяемое оборудование и аппаратура приводятся ниже.

11. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Как уже отмечалось, одним из способов повышения надежности конденсаторов является выявление и отсортировка дефектных конденсаторов, анализ причин, вызывающих эти дефекты, и своевременное их устранение. Для выявления дефектных конденсаторов в процессе их изготовления они подвергаются ряду контрольных операций. Контрольные операции производятся на следующих этапах технологического процесса.

1. После литья заготовок выборочно контролируется 3% заготовок. Этому виду контроля уделяется особенное внимание, так как качество готового конденсатора в значительной степени характеризуется качеством отливки. Контроль качества отливки осуществляется визуально под микроскопом: рассматривается наружная поверхность отливки и поверхность ее пластин, для чего отливка расчленяется на отдельные пластины. Одновременно проверяется соотношение размеров отливки. Соответствие размеров отливки чертежу и табл. 30 обусловливается качеством исполнения литейной формы, а наличие или отсутствие дефектов (раковин, недоливов,

трещин и пр.) — как качеством исполнения литейной формы, так и параметрами шликера и режимом литья. Наличие дефектов в отливке и отклонение ее размеров от заданных требуют тщательной проверки литейной формы, возможно, даже ее замены, и корректировки параметров шликера или режима литья.

2. После шлифовки и полировки производится:

а) контроль по внешнему виду;

б) контроль на наличие короткого замыкания (КЗ);

в) контроль «спекаемости».

Наружным осмотром заготовки выявляются такие дефекты, как усадочные раковины и воздушные включе-

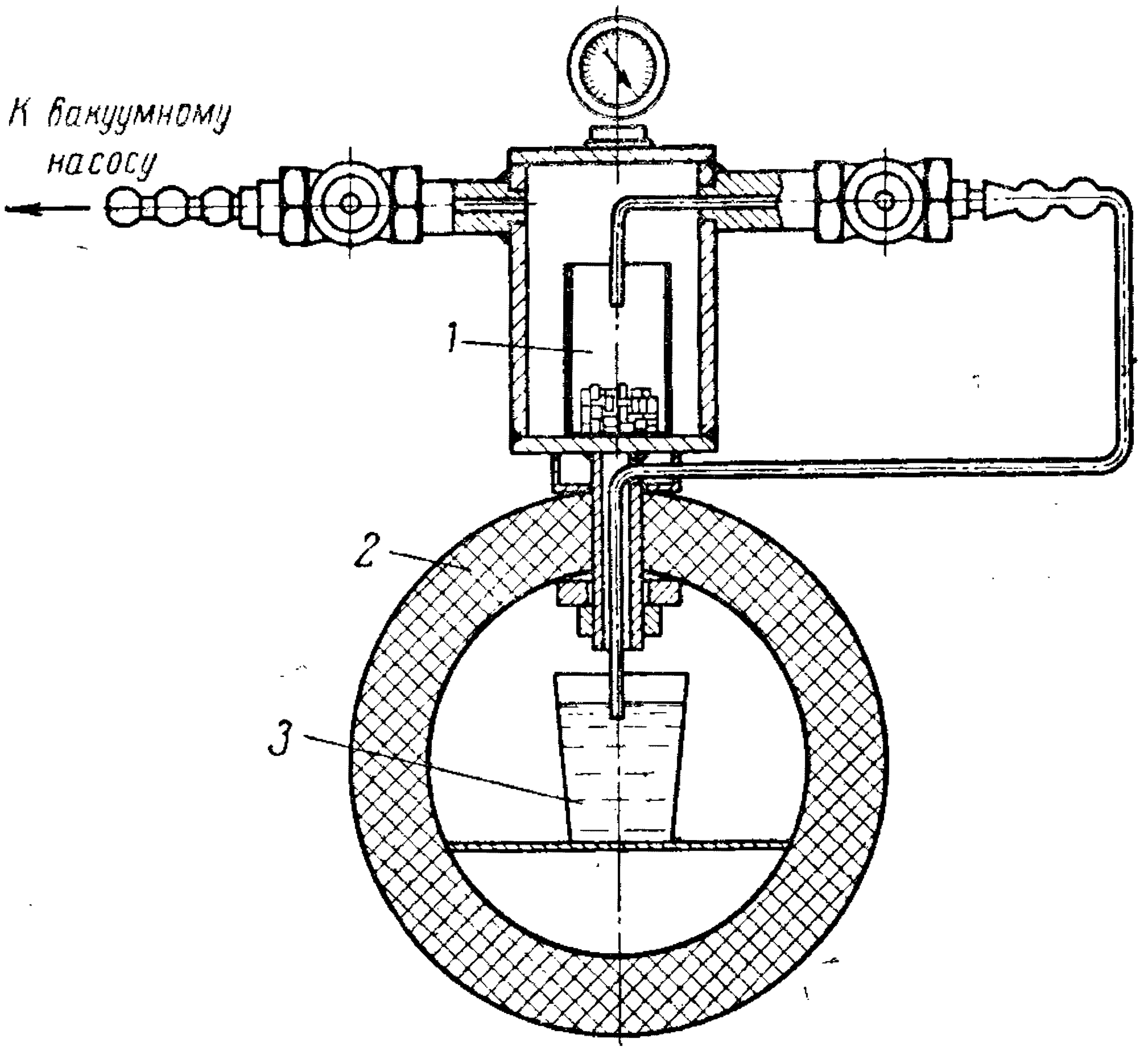


Рис. 83. Приспособление для пропитки заготовок водой.

1 — стакан с заготовками; *2* — термостат; *3* — сосуд с горячей водой.

ния, вскрытие шлифовкой, термические трещины, сколы, следы металла на поверхности заготовки. Дефекты на пластинках заготовки, которые способствуют закорачиванию обкладок пластин в процессе металлизации (сквозные раковины и трещина на пластинках), выяв-

ляются проверкой шлифованной заготовки на наличие короткого замыкания. Надо отметить, что наличие КЗ является результатом грубых дефектов. Поэтому для выявления заготовок с повышенной пористостью (неспеченных) и с мелкими трещинами, не вызывающими КЗ, был разработан способ, условно названный «контролером спекаемости». Этот способ заключается в измерении сопротивления изоляции заготовки, предварительно пропитанной горячей дистиллированной водой. При наличии пор или трещин вода заполняет их и существенно снижает сопротивление изоляции заготовки (сопротивление изоляции дистиллированной воды на несколько порядков ниже сопротивления изоляции керамической заготовки).

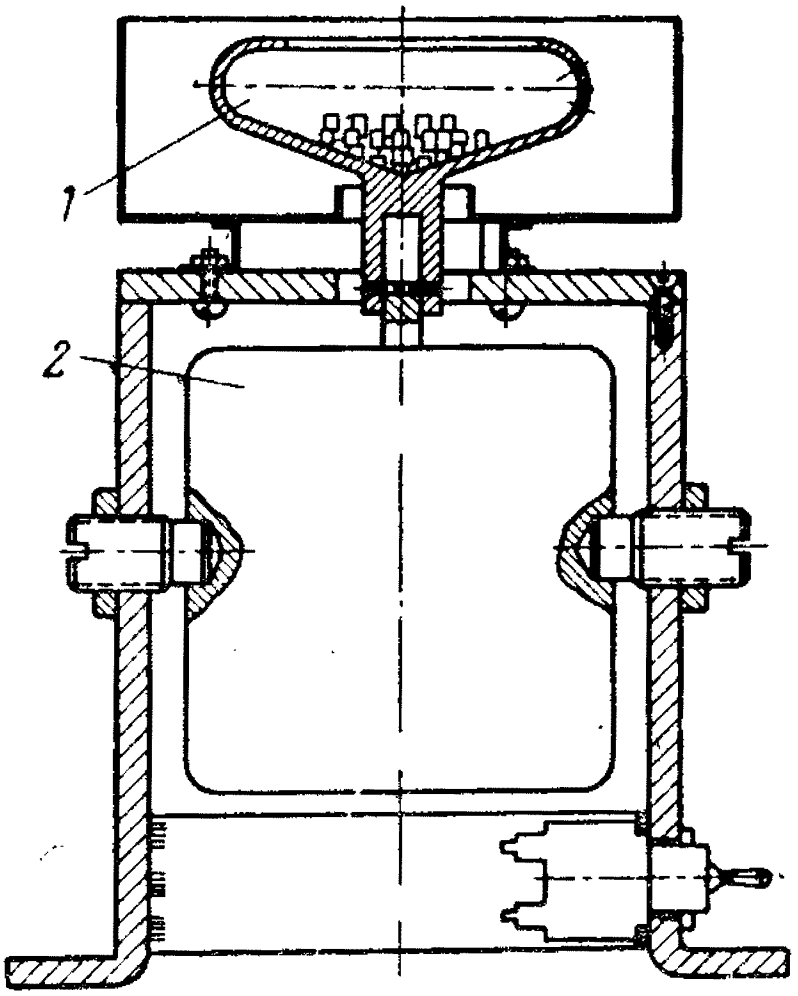


Рис. 84. Приспособление для центрифугирования заготовок, пропитанных водой.

1 — чашка с конденсаторами; 2 — электродвигатель.

Пропитка заготовок водой производится под вакуумом в устройстве, схематически изображенном на рис. 83. Время, необходимое для пропитки заготовок водой, было установлено экспериментально. Пяти минут оказалось достаточно для получения не изменяющихся в зависимости от продолжительности пропитки результатов. Поверхность пропитанных водой заготовок освобождается от пленок воды, шунтирующих электроды заготовки, при ее центрифугировании (рис. 84). Продолжительность центрифугирования составляет 10 *сек*. За это время осуществляется сброс воды только с полированной поверхности заготовки. После центрифугирования производится измерение сопротивления изоляции. Погрешность прибора при измерении $R_{из}$ не должна превышать 20%, а напряжение на испытуемом образце — 100 *в*.

Для измерения сопротивления изоляции КЛГ рекомендуется использовать мегометр типа ТО-2. Изложенный метод контроля оказался эффективным для отбраковки дефектных конденсаторов, а следовательно, и одним из способов повышения их надежности.

Эффективность «контроля спекаемости» в некоторой мере характеризуется экспериментальными данными значений пробивных градиентов конденсаторов (табл. 31). Из табл. 31 видно, что среднее значение пробивных градиентов конденсаторов типа КЛГ (глухие прорези) значительно увеличилось после отбраковки дефектных в процессе контроля спекаемости. Кроме того, отбраковка пористых, неспекшихся образцов и образцов с мелкими трещинами существенно повысила влагостойкость конденсаторов. Так, например, при испытании конденсаторов («глухие» прорези) группы М47 (рабочее напряжение 250 *в*) при напряжении постоянного тока ($u_и = u_р$) в условиях 98% относительной влажности и температуре 40° С за 96 *ч* из 500 конденсаторов, предварительно прошедших контроль спекаемости, отказов не имел ни один. При тех же условиях из числа конденсаторов, забракованных при контроле спекаемости, отказало 37%.

Таблица 31

Группа ТКЕ	Толщина, диэлектрика	Средние значения пробивных градиентов, *кв/мм*	
		без контроля спекаемости	при наличии контроля спекаемости
М47	0,27	13 490	21 100
	0,4	11 950	16 010
М75	0,27	13 220	18 420
	0,4	12 000	16 060
М1300	0,27	10 550	13 060
	0,4	8 940	10 690
Н40	0,27	9 470	11 000
Н70	0,27	7 440	9 400

Надо отметить, что контролю по внешнему виду, на наличие КЗ в спекаемости подвергается 100% шлифованных заготовок КЛГ (глухие прорези). Для того чтобы уменьшить технологические отходы, отсортированные

в процессе перечисленных видов контроля, заготовки расчленяются на две части так, чтобы на одной из них не было наружного дефекта, КЗ или пониженного значения сопротивления изоляции после контроля спекаемости, другая, дефектная часть заготовки вновь расчленяется. Таким образом, из дефектных заготовок большого габарита и большой емкости получаются качественные заготовки меньшего габарита и меньшей емкости. Этот способ, который применим, правда, только для заготовок КЛГ с глухими прорезями, позволяет, несмотря на наличие жесткого контроля, практически не иметь технологических отходов.

3. После припайки выводов и кодировки конденсаторов производится: а) испытание конденсаторов напряжением постоянного тока; б) измерение параметров конденсаторов: сопротивления изоляции, емкости, температурного коэффициента емкости, диэлектрических потерь.

Испытание конденсаторов высоким напряжением проводится с целью выявления конденсаторов, имеющих закрытую пористость, трещины после припайки выводов, построение включения внутри диэлектрика, пластины малой толщины и другие дефекты, снижающие его электрическую прочность. В табл. 32 приведены значения испытательных напряжений конденсаторов типа КЛГ. Выбор испытательных напряжений производится в соответствии с интегральными кривыми рис. 15,*б* и 16,*б*.

Таблица 32

Конструктивное исполнение	Рабочее напряжение, *в*	Испытательное напряжение, *в*, групп ТКЕ					
		М47	М75	М700	М1300	Н40	Н70
Глухие прорези	250	2 800	2 500	2 500	1 700	1 600	—
	160	2 500	2 200	2 200	1 600	1 300	1 200
	70	—	—	—	—	—	1 100
Сквозные прорези	250	800	800	800	700	600	—
	160	600	600	600	600	500	500
	70	—	—	—	—	—	300

Значение параметров и их разброс (стр. 32) в какой-то степени характеризуют технический уровень технологии изготовления конденсаторов и определяют их соответствие предъявляемым к ним техническим требованиям. При измерении параметров КЛГ в нормальных

климатических условиях (относительная влажность до 80%, температура 20—25° С) применялись известные методы [Л. 1]. Для характеристики влагостойкости КЛГ (глухие прорези) они подвергались увлажнению в тече-

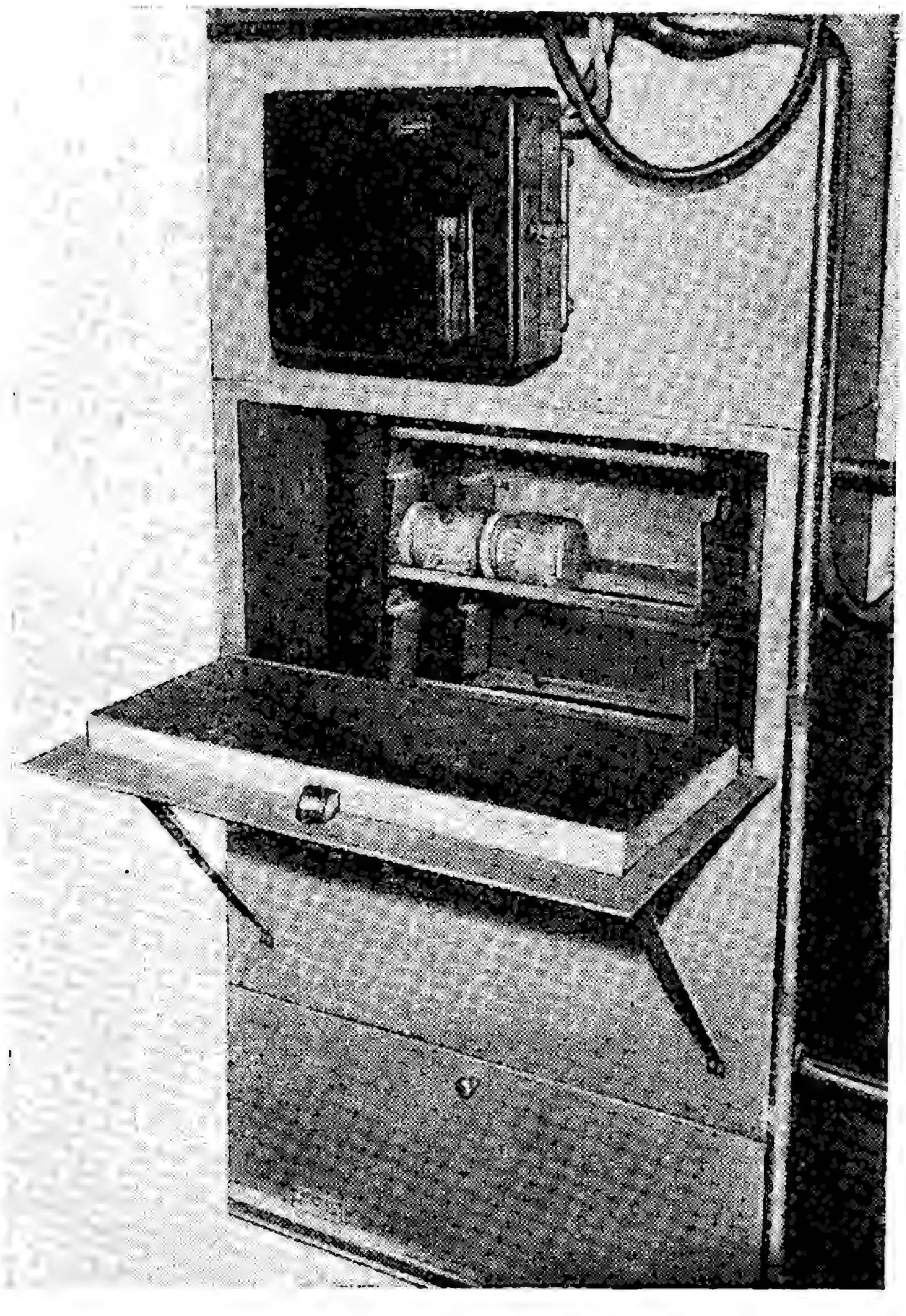


Рис. 85. Конвейерная сушильная камера.

ние 48 *ч* (относительная влажность 98—100%) при температуре 40° С с последующим измерением их параметров непосредственно после окончания испытания.

Для испытания КЛГ во влажной среде они помещаются в стеклянные банки, которые герметически закрываются пластмассовой крышкой. На внутренней части крышки приклеена губка, которая перед испытанием пропитывается дистиллированной водой. Банки с конденсаторами помещаются в конвейерную сушилку

(рис. 85), где температура, равная 40° С, автоматически поддерживается с точностью ±2° С.

Параметры КЛГ измеряются у 100% конденсаторов как в нормальных условиях, так и после «увлажнения», за исключением температурного коэффициента емкости, который контролируется выборочно примерно на 3% от партии конденсаторов. В качестве измерительных приборов для измерения параметров рекомендуется использовать измеритель емкости ИИЕВ-1, измерители потерь ИПП-1, ИПП-2 и ИПП-3, низкочастотный мост для измерения емкости и потерь типа МЛЕ, мегомметр типа ТО-2 для измерения сопротивления изоляции, приборы типа «Градус» для измерения температурного коэффициента емкости.

Таблица 33

Испытательная группа	Наименование испытаний
I	1. Определение механической прочности выводов, вибропрочности и ударной прочности конденсаторов 2. Определение параметров при предельных значениях температуры 3. Испытание конденсаторов циклическими теплосменами 4. Испытание напряжением при пониженном атмосферном давлении
II	Испытание конденсаторов напряжением при максимальной температуре
III	Определение влагоустойчивости конденсаторов

Описанные выше испытания можно классифицировать как контрольные. Надо отметить, что для оценки всего комплекса параметров и характеристик конденсаторов этих испытаний недостаточно. Для такой оценки дополнительно к контрольным приводятся типовые испытания.

Типовые испытания проводятся 1 раз в квартал. Для них отбираются конденсаторы текущего выпуска, прошедшие контрольные испытания. Отобранные конденсаторы делятся на три группы, которые испытываются в соответствии с табл. 33.

Механическая прочность выводов проверяется приложением к ним статической растягивающей нагрузки, равной 1 *кг*, направленной вдоль оси выводов.

При определении вибропрочности и ударной прочности конденсаторов они припаиваются к приспособлению

согласно рис. 86. Приспособление жестко крепится на вибростенде. Испытания проводятся в следующей последовательности:

а) на вибростенде методом фиксированных частот. При этом частота, ускорения и продолжительность испытания устанавливаются согласно данным табл. 34;

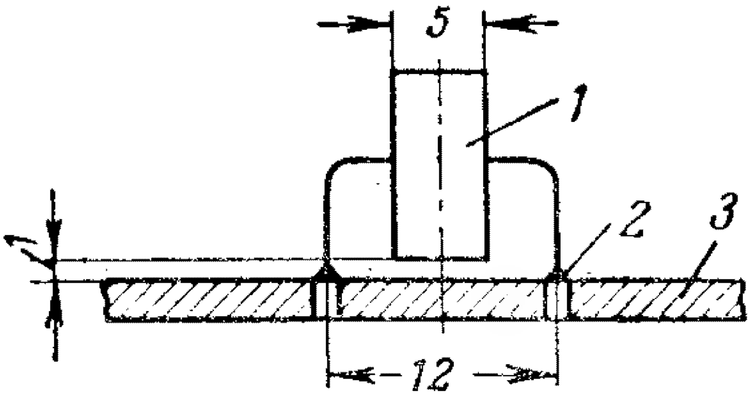


Рис. 86. Способ крепления конденсаторов при испытании их на вибропрочность и ударную прочность.
1 — конденсатор; *2* — место пайки; *3* — плата приспособления.

б) на испытательном стенде с частотой 40—80 ударов в минуту. Число ударов при испытании составляет 4 000, а ускорение равно 75 *g*.

После испытания конденсаторов вибрационной и ударной нагрузками проверяется отклонение их емкости от номинальной и их электрическая прочность. Для проверки электрической прочности конденсаторов они испытываются в течение 10 *сек* напряжением, равным 1,5 рабочего.

Для определения параметров конденсаторов при предельных значениях температур (табл. 17) они помещаются в термостат. Измерение диэлектрических потерь и сопротивления изоляции производится после выдержки конденсатора в термостате в течение 10—30 *мин* при определенных значениях температур без изъятия конденсаторов из термостата.

Испытание конденсаторов циклическими теплосменами производится воздействием на конденсаторы трех температурных циклов, каждый из которых состоит из вы-

Таблица 34

Частота, *гц*	Продолжительность испытания, *мин*	Ускорение или амплитуда
10	20	1,5±0,1 *мм*
20	20	1,5±0,1 *мм*
30	20	1,5±0,1 *мм*
40	20	1,5±0,1 *мм*
50	20	1±0,1 *мм*
80	20	10±1 *g*
100	20	10±1 *g*
150	20	10±1 *g*
200	20	10±1 *g*
300	20	10±1 *g*
400	20	10±1 *g*
500	10	30±1 *g*
600	10	30±1 *g*
800	10	30±1 *g*
1 000	10	30±1 *g*
1 200	10	30±1 *g*
1 400	10	30±1 *g*
1 600	10	30±1 *g*
2 000	20	30±1 *g*
2 500	20	30±1 *g*

держки конденсаторов в течение 30 *мин* при температуре —60±5° С, 5 *мин* при температуре +20±5° С, 30 *мин* при максимально допустимой для данной группы конденсаторов температуре ±5° С, 5 *мин* при температуре +20±5° С. После воздействия температурных циклов производится внешний осмотр конденсаторов и проверка их электрической прочности напряжением, равным 1,5 рабочего. Испытание конденсаторов напряжением постоянного тока, равным рабочему в условиях пониженного давления, производится в барокамере при давлении воздуха в ней 5 *мм рт. ст.* Испытание конденсаторов напряжением продолжается 1 *мин.*

Проверка электрической прочности конденсаторов производится при максимальных для каждой из групп ТКЕ температурах напряжением постоянного тока, равным рабочему, в течение 250 *ч*. Конденсаторы крепятся в секции, которые устанавливаются в термостат. Соединение конденсаторов и секций параллельное. Последовательно каждой из секций подключена сигнальная лампочка. Температура в термостате поддерживается автоматически с точностью ±5° С. В случае отказа конденсатора загорается сигнальная лампочка соответствующей секции, вся секция одновременно отключается и вынимается из термостата. Отказавший конденсатор обнаруживается проверкой всех конденсаторов этой секции на наличие КЗ, затем он удаляется из секции, а секция с остальными конденсаторами вновь помещается в термостат. После окончания испытания производится измерение емкости диэлектрических потерь и сопротивления изоляции конденсаторов.

Для определения влагоустойчивости отобранные для этого испытания конденсаторы делятся на две равные партии. Одна партия испытывается под напряжением постоянного тока, равным рабочему, в течение 96 *ч*, другая — без напряжения — в течение 250 *ч*. Конденсаторы помещаются в камеру влаги, в которой устанавливаются температура, равная 40±2° С, и относительная влажность в пределах 95—98%. Затем на конденсаторы подается напряжение, и по истечении 96 *ч* они извлекаются из камеры влаги. Непосредственно после извлечения конденсаторов из камеры влаги производится последовательно измерение сопротивления изоляции всех конденсаторов, а затем их диэлектрические потери. По истече-

нии 250 *ч* извлекаются из камеры влажности конденсаторы, испытанные без напряжения. Параметры этих конденсаторов измеряются способом, аналогичным изложенному.

При испытании конденсаторов в камере влаги под напряжением к каждому конденсатору последовательно подключается предохранитель. Таким образом, пробитый при этих испытаниях конденсатор автоматически отключается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршанский М. Е., Электрические конденсаторы малой реактивной мощности, Госэнергоиздат, 1953.
2. Богородицкий Н. П., Фридберг И. Д., Электрические основы высокочастотной керамики, Госэнергоиздат, 1958.
3. Богородицкий Н. П. и др., Радиокерамика, Госэнергоиздат, 1963.
4. Воларович М. П., «Исследование реологических свойств дисперсных систем», коллоидный журнал АН СССР, т. XVI, вып. 3, 1954.
5. Воларович М. П., Вязкость смазочных масел при низких температурах, Изд-во АН СССР, 1944.
6. Вул Б. М., Гольдман И. М., Розбаш Р. Я., «Электрическая прочность титанатов металлов второй группы таблицы Менделеева», Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 20, вып. 5, 1950.
7. Грибовский П. О., Горячее литье керамических изделий, Авторские свидетельства № 91236 8/IX 1948; № 137807 8/IX 1948; № 92042, 1950; № 109929 28/III 1955, № 148881, 1959, Бюллетень изобретений, № 14, 1962.
8. Грибовский П. О., Горячее литье керамических изделий, Госэнергоиздат, 1956.
9. Грибовский П. О., Электрический конденсатор—КЛГ.
10. Грибовский П. О., Горячее литье керамических изделий, Госэнергоиздат, 1961.
11. Грибовский П. О., Способ шлифования керамических изделий, авторское свидетельство № 110433 21/I 1955.
12. Грибовский П. О., Миркин М. Л., Миронов А. К., Автоматическая печь для термообработки литых керамических изделий, Изобретение, решение о выдаче авторского свидетельства № 735127, 1961.

13. Казарновский Д. М., Сегнетоэлектрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1956.
14. Популях К. С., Эффект мерцания и методы контроля конденсаторов, Известия ЛЭТИ им. Ульянова, вып. XXVI, 1955.
15. Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.
16. Ребиндер П. А., Образование и механические свойства дисперсных структур, Журнал ВХО Менделеева, том VIII, № 2, 1963.
17. Сканави Г. И., Физика диэлектриков, Гостехиздат, 1949.
18. Шор Я. Б., Статистические методы анализа и контроля качества и надежности, изд-во «Советское радио», 1962.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

Глава первая. **Конструктивные особенности и параметры конденсаторов типа КЛГ** 7

1. Варианты конструкции 7
2. Материал диэлектрика 11
3. Геометрические размеры 17
4. Изоляционно-защитные покрытия 27
5. Параметры и условия эксплуатации 32

Глава вторая. **Технология изготовления конденсаторов типа КЛГ** 54

6. Технологическая схема 54
7. Шликеры 56
8. Литье заготовок 81
9. Термическая обработка 107
10. Металлизация, шлифовка и сборка 120
11. Контроль качества и методы испытаний 133

Литература 142